

**А. И. СЮРДО,
Д. Ю. БИРЮКОВ**

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

А. И. СЮРДО, Д. Ю. БИРЮКОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

*Рекомендовано методическим советом УрФУ в качестве учебного пособия для
студентов, обучающихся по программе бакалавриата по направлению
подготовки 221700 – Стандартизация и метрология
и специальности 200503 – Стандартизация и сертификация*

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2013

УДК 53.08(042.4)

ББК 22.3я73-2

С53

Рецензенты: зав. каф. «Путь и железнодорожное строительство»,
проф., д-р техн. наук Г. Л. Аккерман (УрГУПС);
доц., канд. физ.-мат. наук Ю. В. Щапова
(ИГГ УрО РАН)

Сюрдо А. И.

С53 Физические основы измерений: учебное пособие / А. И. Сюрдо,
Д. Ю. Бирюков – Екатеринбург: УрФУ 2013. 143 с.
ISBN 978-5-7996-0909-2

Учебное пособие содержит лекционный материал по курсу «Физические основы измерений» для студентов направления 221700 «Стандартизация и метрология» и специальности 200503 «Стандартизация и сертификация». Основное внимание уделяется явлениям, понятиям и принципам, положенным в основу современных физических измерений.

Библиогр.: 9 назв. Табл. 5 Рис. 51

УДК 53.08(042.4)

ББК 22.3я73-2

ISBN 978-5-7996-0909-2

© Уральский федеральный
университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники всегда тесно связано с прогрессом в области измерений. В физике, механике и других науках именно измерения позволили точно устанавливать зависимости, выражающие объективные законы природы, поэтому эти науки именуются точными. Важное значение измерений для науки подчеркивали многие ученые. Вот что они писали об этом:

- Г. Галилей «Измеряй все доступное измерению и делай доступным все недоступное ему»;
- Д. И. Менделеев «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука не мыслима без меры»;
- Кельвин (лорд Томпсон) «Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить».

Измерительная техника исторически развивалась в тесной связи с объективными потребностями общества. Факты, свидетельствующие об этом взаимодействии, относятся еще к пятому тысячелетию до нашей эры. Начинающийся товарообмен требовал создания простых мер длины, объема, массы. С развитием общества совершенствовалась также техника измерений.

Промышленная революция XVIII–IX вв. благодаря введению машин привела к быстрому развитию техники линейных измерений, а также измерений электрических величин.

Научно-техническая революция XX в., характеризующаяся широким внедрением средств автоматизации управления и производственных процессов, вызвала значительный подъем всей техники измерений.

Историческое развитие измерений происходит и экстенсивно и интенсивно:

- поскольку современные механизированные, частично или полностью автоматизированные и в высокой степени производительные промышленные производства функционируют только при сравнительно больших затратах на проведение контроля;
- требования к качеству, надежности и быстродействию измерений постоянно возрастают;
- диапазоны измерений ряда физических величин за последние годы расширились на несколько порядков.

Существенное влияние на дальнейшее развитие техники измерений оказывают в XX в. общественные условия усложнившегося товарообмена. При этом следует принимать во внимание возрастающую роль специализации и кооперации производства в национальном и международном масштабах. В промышленных странах трудоемкость контроля и измерений составляет в среднем от 10 до 15 % трудоемкости всего общественного производства. В некоторых отраслях промышленности, например в производстве электронных узлов и их компонентов, эта доля значительно выше и постоянно возрастает.

Экономия затраченного времени только на 1 % благодаря более широкому применению средств измерений и повышению квалификации лиц, занимающихся измерениями, обеспечила бы появление существенных научных и экономических резервов.

Пример распределения видов измерений производственных процессов и параметров продукции для обеспечения качества штуч-

ного производства (машиностроение, приборостроение) приведен ниже:

Счет числа изделий.....	25 %
Длина (размеры, допуски, положение, расстояние, путь)...	25 %
Время	15 %
Температура	8 %
Количество (масса, объем) вещества.....	5 %
Расход (массовый объемный) вещества.....	4 %
Уровень	4 %
Давление	4 %
Прочие (плотность, влажность, сила тока, напряжение, скорость).....	10 %

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью преподавания дисциплины «Физические основы измерений» является изучение и систематизация физических процессов и явлений, положенных в основу измерений и контроля свойств материалов и изделий в промышленности и научных исследованиях, подготовка специалистов к решению сложных проблем.

Курс «Физические основы измерений» представляет собой необходимый этап в обучении студентов направления 221700 «Стандартизация и метрология» и специальности 200503 «Стандартизация и сертификация» и призван сформировать у них систему знаний о принципах построения современных измерительных преобразователей и датчиков, методах измерения электрических и неэлектрических величин.

Сведения, полученные в данном курсе, служат основой для усвоения материала специальных дисциплин, посвященных современным физическим методам и средствам измерений, испытаний и контроля технологических процессов, а также прикладной метрологии, стандартизации и сертификации в приборостроении.

Перечень дисциплин, усвоение которых студентами необходимо для изучения данной дисциплины:

- общая физика;
- математика;
- химия.

2. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

2.1. Физические величины и единицы измерения

С философской точки зрения измерение – познавательный процесс, включающий определение характеристик материальных объектов с помощью технических средств. Измерение оказывается возможным в силу наличия количественной стороны в объектах материальной действительности, т.е. способности того или иного свойства этих объектов изменяться в широких пределах, не теряя качественного своеобразия, качественной однородности. Измерением достигается однозначное количественное описание свойств предметов, составляющее важный элемент познания.

Целью эксперимента является поиск таких параметров физических явлений, которые можно измерить, получив численные значения. Между этими измеренными значениями уже можно установить определенную функциональную зависимость. Свойства физических объектов и процессов, которые можно прямо или косвенно измерить, называют физическими величинами.

Физические законы, связывающие между собой эти величины, имеют вид математических уравнений. Физические величины можно разделить на классы, каждый из которых описывает определенный круг явлений.

При измерении физической величины ее значение G сравнивают с единицей измерения $[G]$. Число, которое получается при измерениях, называют числовым значением $\{G\}$ физической величины:

$$G = \{G\} [G] \quad (2.1)$$

Таким образом, любая физическая величина равна произведению численного значения и единицы измерения.

Физические величины связаны математическими уравнениями. Можно выделить несколько независимых величин, которые не сводятся одна к другой. Их называют основными физическими величинами.

Эти величины, вообще говоря, можно выбрать произвольно. Поэтому существует международное соглашение, которое определяет основные физические величины. (Их выбор обусловлен соотношениями удобства.) Все остальные величины называют производными. Они определяются уравнениями, в которые входят основные физические величины или их комбинации.

Производные физические величины можно представить через произведение основных величин B_i :

$$G = B_1^{\beta_1} \cdot B_2^{\beta_2} \dots B_n^{\beta_n} \quad (2.2)$$

Показатели степени β_i это положительные или отрицательные целые числа.

В 1960 г. было заключено международное соглашение о выборе основных физических величин. Эти величины, а также производные физические величины составляют основу Международной системы единиц СИ (Système International d'Unités). Во многих странах эта система единиц имеет силу закона. Международную систему единиц СИ очень удобно использовать как в теории, так и на практике. Производные единицы в СИ получаются из основных по уравнению (2.2) при целых значениях показателей β_i . Наиболее важные из них имеют собственные имена и краткие обозначения.

В табл. 2.1. приведены основные физические величины и их единицы измерения. Существуют точные определения этих величин. Отметим, что на практике эти определения реализуются с конечной точностью. Для этого используют разнообразные методы измерений, которые постоянно совершенствуются. Если обратиться к истории, то мы увидим, как, с одной стороны, возрастали требования к точности определения физических величин, а с другой стороны, возникали принципиально новые способы измерения.

Таблица 2.1

Основные величины и единицы измерения

Физическая величина	Обозначение величины	Единица измерения	Обозначение единицы
Длина	l	Метр	м
Масса	m	Килограмм	кг
Время	t	Секунда	с
Сила электрического тока	I	Ампер	А
Температура	T	Кельвин	К
Количество вещества	n	Моль	моль
Сила света	I_v	Кандела	кд

2.2. Физические основы базисных эталонов единиц измерений

Исследователи стремились и стремятся связать основные физические величины с фундаментальными постоянными, которые можно в любое время измерить с хорошей воспроизводимостью. Характерным примером является единица длины. Сначала метр определяли

через длину окружности Земного шара, затем – через длину волны определенного излучения: с 1927 г. – через длину волны красной линии кадмия Cd, а с 1960 г. – через излучение изотопа криптона ^{86}Kr в оранжевой области видимого спектра:

метр – длина, равная 1 650 763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

В 1983 г. состоялась 17-я Генеральная конференция по мерам и весам. На было установлено новое определение метра в связи с тем, что в настоящее время можно очень точно измерить скорость света:

метр равен длине отрезка, которую свет проходит в вакууме за $1/299\,792\,458$ секунды.

Скорость света в вакууме точно измерена и равна $c = 299\,792\,458$ м/с. Скорость света выбрана для определения метра потому, что она является одной из фундаментальных постоянных природы. Измерить эталонную длину можно, определив время, за которое свет проходит этот отрезок.

Особое место среди основных физических величин занимает масса, поскольку ее определяют путем сравнения с эталоном, который хранится в международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа. Этот эталон представляет собой цилиндр из сплава 90% платины и 10% иридия, диаметр и высота которого равны 39 мм. До сих пор пока не удавалось достаточно точно выразить величину эталонной массы через фундаментальные постоянные. Еще непонятно как это можно сделать.

Единицей массы служит килограмм. Он равен массе международного эталона килограмма. (1889г., 1901 г.).

Единица времени – секунда – в настоящее время определяется следующим образом: секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома ^{133}Cs (1967 г.).

Эталон секунды реализуется с помощью цезиевого СВЧ излучения ($9,192631770 \cdot 10^9$ Гц). Для определения такого промежутка времени необходимо уметь “сосчитать” 9 192 631 770 периодов атомного излучения. Очевидно, что в будущем появятся генераторы частоты, которые будут более точными, чем “атомные часы” на изотопе ^{133}Cs . Тогда потребуются новое определение единицы времени.

Взаимосвязь между электродинамикой и механикой позволила в 1948 г. заново определить единицу силы тока:

Ампер равен силе (тока) постоянного электрического тока, который, протекая по двум параллельным прямолинейным бесконечно длинным проводникам с пренебрежимо малым круговым сечением, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия между ними $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Тем самым определяется численное значение другой постоянной фундаментальной физики: магнитной постоянной μ_0 . Она равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$. Это соотношение в принципе эквивалентно приведенному выше определению ампера. Зная, что $C = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}$ можно точно определить диэлектрическую постоянную ε_0 , которую не нужно измерять экспериментально.

Основной термодинамической величиной является *термодинамическая температура*. Она измеряется в кельвинах. Поскольку для температуры существует значение абсолютного нуля, то для определения этой величины необходимо зафиксировать еще одну точку. В качестве нее выбрана тройная точка воды.

Кельвин, единица термодинамической температуры, равен 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды (1967 г.).

Следует отметить, что современная термодинамика определяет температуру как величину, выражающую состояние внутреннего движения равновесной макроскопической системы и определяемую внутренней энергией и внешними параметрами системы.

Непосредственно температуру измерить невозможно, можно лишь судить о ней по изменению внешних параметров, вызванному нарушением состояния равновесия благодаря теплообмену с другими телами.

Практическое измерение температуры проводят с помощью Международной практической температурной шкалы (ITS-68/75 \equiv МПТШ-68/75), которая основана на целом ряде хорошо воспроизводимых фиксированных температурных точек:

- тройная точка водорода – 13,81 К
- тройная точка кислорода – 54,361 К
- точка кипения кислорода – 90,188 К
- тройная точка воды – 273,16 К
- точка кипения воды – 373,15 К
- точка затвердевания золота – 1377 К

Количество вещества было введено в СИ в качестве основной величины в 1971 г. В результате появилась возможность описывать количественные соотношения в химии и физической химии с помощью единиц СИ. Единица количества вещества определяется следующим образом:

Моль представляет собой количество вещества в системе, содержащей столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C . При использовании моля следует точно определить тип отдельной частицы. В качестве отдельной частицы могут выступать атомы, молекулы, ионы, электроны и другие частицы или группы частиц с точно заданными параметрами. Это число частиц называют числом Авогадро.

Электромагнитное излучение описывается с помощью, так называемых, энергетических величин, которые выражаются через первые три величины (единицы). ($S=[E \times H]$ – вектор Умова-Пойтинга). Если же нужно описать излучение через его воздействие на человеческий глаз, то для этого используют соответствующие фотоэлектрические (светотехнические) величины. Основной величиной при этом служит сила света, которая измеряется в канделах.

Кандела – сила света источника, монохроматическое излучение которого частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, излучаемое в определенном направлении в телесный угол величиной 1 стерадиан, имеет мощность $1/683$ Вт. ($\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Гц $\Rightarrow \lambda = 555$ нм – максимальная чувствительность глаза).

Определим теперь понятие размерности физической величины. Размерность показывает, как связана данная величина с основными

физическими величинами. Поэтому нет нужды отдельно определять единицу измерения для каждой физической величины: они выражаются через произведение основных физических единиц с целыми показателями степени, равными 1. В СИ основным физическим 14 величинам соответствуют основные единицы измерения: **длина, масса, время, сила тока, температура, количество вещества и сила света**. Их обозначают соответственно символами L, M, T, I, Θ, N, J .

Размерность некоторой величины в общем виде выражается в системе СИ как

$$\underline{\dim G = L^{\beta_1} M^{\beta_2} T^{\beta_3} I^{\beta_4} \Theta^{\beta_5} N^{\beta_6} J^{\beta_7}} \quad (2.3)$$

В этом выражении все показатели степени β_i ($i=1, 2, \dots, 7$) – целые числа. Если все они равны нулю, то величина G будет безразмерной. Так размерность потенциальной энергии E_{nom} имеет вид

$$E_{nom} = \dim(mgh) = ML^2T^{-2} \quad (2.4)$$

Физическая величина и ее размерность это не одно и то же. Одинаковую размерность могут иметь совершенно разные по своей природе физические величины. Например, в электротехнике приходится для различных физических величин, таких как сила электрического тока и магнитодвижущая сила, использовать единицу ампер, А; для индуктивности и магнитной проводимости – генри, Гн. В механике одинаковую размерность имеют круговая частота ω – $[\omega]=\text{с}^{-1}$, частота вращения, f – $[f]=\text{с}^{-1}$, угловая скорость, ω – $[\omega]=\text{с}^{-1}$. Размерность не содержит информации о том, является ли данная физическая величина скаляром, вектором или тензором. Однако величина размерности часто используется для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

2.3. Основные функции измерительной системы

Рассмотрим функциональную блок-схему измерительной системы.

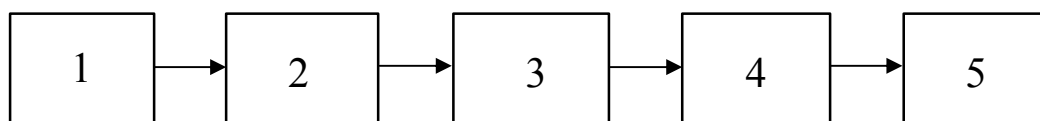


Рис. 2.1. Функциональная блок-схема измерительной системы:

1 - восприятие измеряемой величины; 2 - преобразование измерительной информации, усиление; 3 – вычислительные операции; 4 – передача измерительной информации; 5 – отображение измерительной информации

Эта блок-схема не полно отражает последовательность прохождения сигналов. Но анализ существующих измерительных приборов и измерительных схем показывает, что можно условно разделить любую измерительную систему на отдельные части. Каждая часть выполняет свою функцию, которая является достаточно общей для всех систем. Такая блок-схема получается, если изобразить эти функции в виде символических блоков, которые связаны между собой сигналами, характеризующими физические величины.

Кратко рассмотрим наиболее важные функциональные блоки.

1. Восприятие измеряемой величины.

Первичной задачей любой измерительной системы является восприятие физической величины. Часто *чувствительный элемент* преобразователя не является в прямом смысле самостоятельным элементом прибора, а совмещен с другими его элементами. В процессе измерения физической величины основной задачей является выработка сигнала измерительной информации в форме удобной для

дальнейшей ее обработки при минимальной обратной реакции системы (помехах, энергетических затратах).

2. Преобразование измерительной информации и ее усиление.

При измерении всегда используются определенные физические явления. В результате возникает необходимость преобразования сигнала, функционально связанного с измеряемой физической величиной, в другую физическую величину (например, давление → напряжение; температура → давление и т.п.).

Наряду с преобразованием измерительной информации часто возникает необходимость усиления или ослабления сигнала, например его мощности, преобразования выходного сопротивления или изменения уровня сигнала.

3. Вычислительные операции.

Каждый измерительный прибор выполняет (часто в неявном виде) какую-либо вычислительную операцию. Как указывалось ранее, *измерением называют сравнение с так называемой мерой*. В простейшем случае операция нормирования сигнала представляет собой градуировку шкалы. Кроме того, при обработке измерительной информации наряду с четырьмя основными арифметическими операциями выполняются возведение в степень, извлечение корня, интегрирование, логарифмирование и др. Такие операции необходимы в том случае, если зависимость между первичной измеряемой величиной, которая воспринимается датчиком, и величиной, которую представляет указатель, не является линейной. Например, такого рода нелинейности имеют место при определении скорости потока по перепаду давлений, электрометрическом измерении pH и т.д. Вычисления

также необходимы в том случае, когда для получения отображаемой величины требуется измерить несколько величин одновременно (например, при измерении тепловых потоков).

4. Обработка измерительной информации.

Значения величин, которые были получены в результате операций, рассмотренных в предыдущем пункте, используются не только для моментального отображения, но все чаще подвергаются обработке – уплотнению информации. При этом наряду с выполнением дальнейших вычислительных операций обычно необходимо временное запоминание измеряемых величин. Такая обработка измерительной информации осуществляется прежде всего в связи с анализом сигналов во временном или, соответственно, частотном диапазоне (получение усредненных значений, анализ частотного спектра и т.д.). С помощью компьютеров могут быть выполнены, кроме того, любые аналитические и логические операции.

5. Отображение измерительной информации.

Если измерительная информация не подлежит дальнейшей автоматической обработке, а передается в визуальной форме наблюдателю, то измерение заканчивается ее отображением. Существует много способов отображения. Следует отметить, конкретный способ отображения измерительной информации необходимо учитывать при анализе погрешностей. В настоящее время нередко выбор метода измерения определяется требуемым видом отображения измеряемой величины. Так, если требуется цифровая информация, то целесообразно на ранних стадиях измерения переходить к дискретным методам.

Таким образом, измерение физической величины в общем случае представляет собой достаточно сложный процесс. Первичную измеряемую величину воспринимают чувствительные элементы средства измерения и преобразуют ее в электрическую, гидравлическую или пневматическую величину на основе физического закона, однозначно определяющего связь между этими двумя величинами. Указанное преобразование может осуществляться многоступенчато. Например, механическая сила, действующая на пружину, деформирует ее; деформация пружины преобразовывается тензометром в изменение сопротивления, которое затем преобразуется при помощи мостовой схемы в изменение напряжения или силы тока. Однако и эта электрическая величина обычно еще не пригодна для выдачи измерительной информации (отсчета показаний или регистрации). При дальнейшем преобразовании в другую величину или только при усилении подлежащая измерению физическая величина приводится к виду, пригодному к выдаче или дальнейшей обработке.

2.4. Определение измерения и следствия из него

Измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.¹

В этом определении отражены следующие главные признаки понятия «измерение»:

- 1) измерять можно свойства реально существующих объектов, то есть физические величины;

¹ Все термины определяются в ГОСТ 16263-70 «Метрология. Термины и определения».

- 2) измерение требует проведения опытов, то есть теоретические рассуждения или расчеты не могут заменить эксперимент;
- 3) для проведения опытов требуются особые технические средства – средства измерений, приводимые во взаимодействие с материальным объектом;
- 4) результатом измерения является значение физической величины.

2.5. Классификация средств измерений

Измерения производятся с помощью *средств измерений*. Ими называются технические средства, имеющие нормированные метрологические характеристики.

По функциональному назначению средства измерений делятся на следующие группы: меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные системы и измерительные установки.

Под *мерой* понимают средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Например, мерой является резистор, воспроизводящий сопротивление определенного размера с известной погрешностью.

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не дающей наблюдателю возможности непосредственно воспринимать результат измерения. Измерительный

преобразователь, к которому непосредственно подводится измеряемая величина, называется первичным измерительным преобразователем. Измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины в заданное число раз, называют *масштабным измерительным преобразователем*.

Первичные измерительные преобразователи, размещаемые непосредственно на объекте исследования и удаленные от места обработки, отображения и регистрации измерительной информации, называют *датчиками*.

Измерительным прибором называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, например, в виде цифрового отсчета на отсчетном устройстве. Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины, называют *аналоговым измерительным прибором*. Измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретный (кодированный) сигнал измерительной информации и дающий показания в цифровой форме, называют *цифровым измерительным прибором*.

Измерительная установка – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте. Измерительная установка может содержать в своем составе меры, измерительные приборы, а также различные вспомогательные устройства.

В современной промышленности с усложняющимися технологическими процессами для их эффективного контроля и оптимального управления ими требуется информация о большом числе параметров объектов, а также оперативная обработка информации. Это привело к появлению сложных систем, предназначенных для автоматического сбора и переработки информации.

Измерительная система – совокупность средств измерений (мер, измерительных преобразователей и приборов) и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме удобной для автоматической обработки, передачи и/или использования в автоматических системах управления.

2.6. Виды и методы измерений

Измерения в зависимости от способа обработки экспериментальных данных для нахождения результата относят к прямым, косвенным, совместным или совокупным.

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения.

Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. При косвенном измерении значение измеряемой величины получают путем решения уравнения $x = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, где $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ – значения величин, полученных прямыми измерениями.

Пример косвенного измерения: сопротивление резистора R находят из уравнения $R=U/I$ (закон Ома), в которое подставляют измеренные значения падения напряжения U на резисторе и тока I через него.

Совокупные измерения – одновременные измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, составленных из результатов прямых измерений различных сочетаний этих величин.

Пример совокупного измерения: измерение сопротивлений обмоток трехфазного двигателя, соединенных треугольником (или звездой), путем измерений сопротивлений между различными вершинами треугольника (или звезды). По результатам трех измерений составляют систему из трех уравнений, решая которую, определяют сопротивления обмоток и делают вывод об их целостности, наличии короткозамкнутых витков и обрывов.

Совместные измерения – одновременные измерения нескольких не одноименных величин для нахождения зависимости между ними.

Пример совместного измерения: определение функциональной зависимости сопротивления резистора от температуры, заданной уравнением $R_t = R_0(1+At+Bt^2)$, где t – температура, R_0 , A , B – параметры. Измеряя сопротивление резистора при трех различных температурах, составляют систему из трех уравнений, решая которую, определяют параметры R_0 , A и B .

Взаимодействие средств измерений с объектом основано на физических явлениях, совокупность которых составляет *принцип изме-*

рений, а совокупность приемов использования принципа и средств измерений называют *методом измерений*.

В зависимости от способа применения меры известной величины выделяют метод непосредственной оценки и методы сравнения с мерой.

При методе непосредственной оценки значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого преобразования. *Методы сравнения с мерой* – методы, при которых производится сравнение измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой.

Группа методов сравнения с мерой включает в себя следующие методы: нулевой, дифференциальный и метод замещения.

При нулевом методе разность измеряемой величины и известной величины или разность эффектов, производимых измеряемой и известной величинами, сводится в процессе измерения к нулю, что фиксируется высокочувствительным прибором – нуль-индикатором. При дифференциальном методе разность измеряемой величины и величины известной, воспроизводимой мерой, измеряется с помощью измерительного прибора. Неизвестная величина определяется по известной величине и измеренной разности. При методе замещения измеряемая величина замещается мерой, подбираемой или регулируемой таким образом, чтобы показания измерительного прибора оставались неизменёнными; при этом значение измеряемой величины равно номинальному значению меры.

2.7. Измерение параметров электрических цепей

Основными параметрами элементов и цепей с сосредоточенными постоянными являются:

- сопротивление R резисторов;
- емкость C и тангенс угла потерь δ конденсаторов;
- индуктивность L и добротность Q катушки;
- взаимная индуктивность M_{12} двух катушек.

Измерение параметров элементов и цепей может быть прямое и косвенное. Прямые измерения выполняются методами непосредственной оценки, косвенные – вольтметром и амперметром; методами нулевыми и замещения.

Далее подробно будут рассмотрены два наиболее часто применяемых метода измерения параметров электрических цепей: мостовой и резонансный.

2.7.1 Мостовой метод измерения. Теория мостовых схем

Мосты – приборы, служащие для измерения сопротивлений, в основе работы которых лежат дифференциальный или нулевой методы измерения. Мостовые схемы широко применяются в измерительной технике для измерения сопротивления, емкости, индуктивности, добротности, частоты, тангенса угла диэлектрических потерь. При их применении обеспечивается:

- большая точность измерения;
- высокая чувствительность;
- возможность измерять различные величины.

Мосты делятся на следующие типы:

1) уравновешенный (в основу заложен нулевой метод измерения) – мост, который находится в равновесном состоянии в момент измерения;

2) неуравновешенный (в основу заложен дифференциальный метод измерения) – мост, который находился в равновесии до момента измерения, а в момент измерения он переходит в неравновесное состояние.

В зависимости от источника питания моста различают мосты переменного и постоянного тока. Наиболее часто в технике измерений используется мост Уитстона (рис. 2.2).

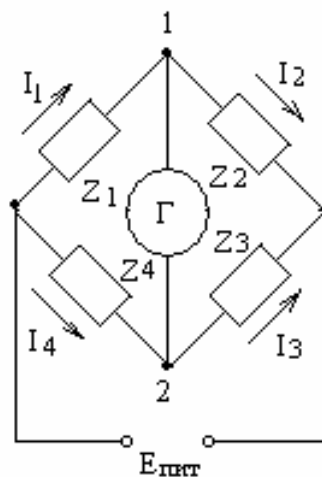


Рис. 2.2 Мост Уитстона

Данный мост будет находиться в состоянии равновесия, если разность потенциалов между точками 1 и 2 будет равна нулю. Состояние равновесия может быть обнаружено с помощью гальванометра G , ток через который будет равен также нулю.

В случае $I_G=0$ по первому закону Кирхгофа можно записать $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$. Тогда падения напряжения на элементах Z_1 и Z_2 будут равны падениям напряжения на элементах Z_4 и Z_3 :

$$I_1 Z_1 = I_4 Z_4, \quad (2.5)$$

$$I_2 Z_2 = I_3 Z_3. \quad (2.6)$$

Разделим (2.5) на (2.6):

$$I_1 Z_1 / (I_2 Z_2) = I_4 Z_4 / (I_3 Z_3) \Rightarrow Z_1 / Z_2 = Z_4 / Z_3. \quad (2.7)$$

Таким образом, последнее выражение можно записать в виде:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4. \quad (2.8)$$

Оно является условием равновесия моста; в измерительной технике формулируется так: мост находится в равновесном состоянии, когда произведения сопротивлений противоположных плеч равны друг другу.

Пусть все сопротивления являются активными, то есть $Z_i = R_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), тогда условие равновесия моста будет выглядеть следующим образом:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (2.9)$$

Допустим, что R_1 неизвестно. Обозначим $R_1 = R_x$. Из условия равновесия моста находим $R_x = R_2 R_4 / R_3$. Если $R_4 / R_3 = k = \text{const}$, то $R_x = k \cdot R_2$. Полученное выражение является линейной функцией сопротивления R_2 , тогда его можно градуировать в значениях неизвестного сопротивления R_x .

Если все сопротивления являются реактивными ($Z_i = A_i + jB_i = |Z| e^{j\varphi}$, где $\text{tg } \varphi = B_i / A_i$, $|Z| = (A_i^2 + B_i^2)^{1/2}$), то условие равновесия моста можно записать как

$$|Z_1| e^{j\varphi_1} |Z_3| e^{j\varphi_3} = |Z_2| e^{j\varphi_2} |Z_4| e^{j\varphi_4}; \quad (2.10)$$

$$|Z_1| |Z_3| e^{j(\varphi_3 + \varphi_1)} = |Z_2| |Z_4| e^{j(\varphi_4 + \varphi_2)}. \quad (2.11)$$

Два комплексных числа равны друг другу при выполнении следующих условий:

а) $|Z_1||Z_3| = |Z_2||Z_4|$ – условие для модулей,

б) $\varphi_3 + \varphi_1 = \varphi_4 + \varphi_2$ – фазовое условие.

Рассмотрим несколько частных случаев.

1. Пусть в два смежных плеча помещены реактивные сопротивления Z_1 и Z_2 , а в противоположные – активные: $Z_3 = R_3$, $Z_4 = R_4$. Если Z_3 и Z_4 являются активными, то $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, а из фазового условия следует, что $\varphi_1 = \varphi_2$. Тогда Z_1 и Z_2 должны иметь одинаковые реактивности. Допустим, что $Z_1 = 1 / (j\omega C_1) = 1 / (j\omega C_x)$ и $Z_2 = 1 / (j\omega C_2)$.

Подставим данные выражения в выражения для условий равновесия моста:

$$R_3 / (j\omega C_x) = R_4 / (j\omega C_2); \quad (2.12)$$

$$R_4 C_x = R_3 C_2 \Rightarrow C_x = R_3 C_2 / R_4. \quad (2.13)$$

Таким образом, изменяя емкость C_2 , можно добиться равновесия моста.

Следует обратить внимание на то, что если расположить сопротивления с одинаковой реактивностью в противоположные плечи: $Z_2 = 1 / (j\omega C_2)$, $Z_4 = 1 / (j\omega C_4)$, а $Z_1 = R_1$, $Z_3 = R_3$, то такой мост уравновесить нельзя:

$$R_1 R_3 \neq -1 / (\omega^2 C_2 C_4). \quad (2.14)$$

Из выражения (2.14) видно, что в правой части уравнения стоит отрицательное число, а в левой – положительное.

Рассмотрим случай, когда в двух смежных плечах располагаются индуктивности:

$$Z_1 = j\omega L_1; \quad (2.15)$$

$$Z_2 = j\omega L_2; \quad (2.16)$$

$$Z_3 = R_3; \quad (2.17)$$

$$Z_4 = R_4. \quad (2.18)$$

Подставим данные выражения в выражения для условий равновесия моста:

$$R_3 j\omega L_1 = R_4 j\omega L_2; \quad (2.19)$$

$$L_1 = R_4 L_2 / R_3. \quad (2.20)$$

Таким образом, изменяя индуктивность L_2 , можно добиться равновесия моста.

Важно отметить, что если переменную емкость в выражении (2.13) можно изменять плавно, то индуктивность в выражении (2.20) варьировать значительно сложнее. Поэтому чаще для уравнивания моста применяются переменные конденсаторы, а для измерения реактивного сопротивления с индуктивным типом применяют схему подключения, рассмотренную ниже.

2. Пусть два реактивных элемента с разными реактивностями располагаются в противоположных плечах моста. Допустим, что

$$Z_1 = j\omega L_1, Z_3 = 1 / (j\omega C_3). \quad (2.21)$$

Если выбрать $Z_2 = R_2, Z_4 = R_4$, то $\varphi_4 = \varphi_2 = 0$ и $\varphi_3 + \varphi_1 = 0$. Условие равновесия моста можно записать как

$$(j\omega L_1) / (j\omega C_3) = R_2 R_4; \quad (2.22)$$

$$L_1 = C_3 R_2 R_4. \quad (2.23)$$

Таким образом, изменяя емкость C_3 , можно уравновесить мост так, чтобы выполнялись условия для фаз $\varphi_3 + \varphi_1 = 0$ и для модулей $|Z_1| \cdot |Z_3| = R_2 R_4$.

В заключении необходимо подчеркнуть, что с помощью моста переменного тока, как правило, измеряют емкость и индуктивность, добротность и тангенс угла потерь, а с помощью моста постоянного тока – сопротивление резисторов.

2.7.2. Резонансный метод измерения параметров двухполюсника

При резонансном методе измерения параметров используют резонансные цепи (сочетание двух элементов с разными реактивностями – емкость и индуктивность). Возможно два варианта соединения таких элементов – параллельное и последовательное. Поэтому различают параллельные и последовательные колебательные контуры. Рассмотрим сначала схему для параллельного контура (рис. 2.3).

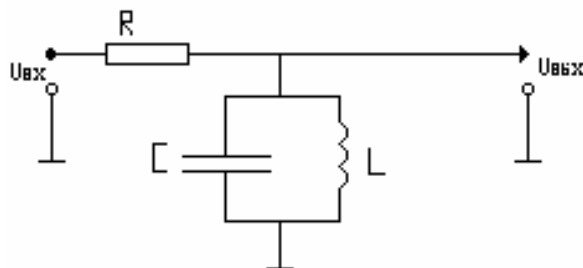


Рис. 2.3. Параллельный колебательный контур

Выходное напряжение, измеряемое на контуре, будет равно:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (Z_C \parallel Z_L) / (R + Z_C \parallel Z_L), \quad (2.24)$$

где

$$Z_C \parallel Z_L = Z_C Z_L / (Z_C + Z_L) = [j\omega L / (j\omega C)] / [1/(j\omega C) + j\omega L] = (L/C) / j[\omega L - 1/(\omega C)].$$

Резонанс в электрической цепи проявляется тогда, когда модуль реактивного сопротивления индуктивности $|Z_L| = \omega L$ равен модулю реактивного сопротивления емкости $|Z_C| = 1/(\omega C)$. Если $\omega L = 1/(\omega C)$, то получим $Z_C \parallel Z_L = \infty$. Частота, при которой наблюдается резонанс,

называется *резонансной*. Различают круговую ($\omega_{\text{рез}}$) и линейную ($f_{\text{рез}}$) резонансные частоты, связанные между собой соотношением $\omega_{\text{рез}} = 2\pi f_{\text{рез}}$. Они определяются из условия:

$$\omega_{\text{рез}}L = 1/(\omega_{\text{рез}}C) \Rightarrow \omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC} \Rightarrow f_{\text{рез}} = 1/(2\pi\sqrt{LC}). \quad (2.25)$$

В момент резонанса выражение $Z_C \parallel Z_L / (R + Z_C \parallel Z_L)$ при $\omega \rightarrow \omega_{\text{рез}}$ приближается к 1, тогда $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}$. Контур настраивается в резонанс по максимальному выходному напряжению. Резонанс может быть достигнут изменением частоты, емкости и индуктивности. Однако наиболее часто в технике измерений используется не параллельный, а последовательный колебательный контур (рис. 2.4).

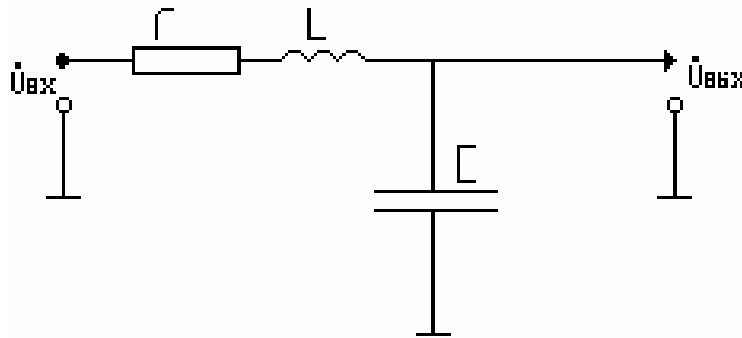


Рис. 2.4. Последовательный колебательный контур

В данном случае выходным является напряжение на емкости:

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх}} / j\omega C) / (r + j\omega L + 1/\omega C) = (U_{\text{вх}} / j\omega C) / [r + j(\omega L - 1/\omega C)], \quad (2.26)$$

где r – активное сопротивление катушки индуктивности L . Используя условие резонанса $\omega L = 1/(\omega C)$, из (2.26) получаем:

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх}} / j\omega C) / r = (U_{\text{вх}} \omega L / j) / r. \quad (2.27)$$

Далее определим модуль отношения выходного и входного напряжения: $|U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}| = \omega L / r$. Величина $\omega L / r$ называется *добротностью катушки индуктивности* Q , тогда $|U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}| = Q$. Следовательно-

но, выходное напряжение, снимаемое с конденсатора в последовательном контуре, прямо пропорционально добротности катушки индуктивности. Указанное утверждение справедливо, если выполняются следующие условия: $\omega L = 1 / (\omega C)$, $U_{\text{вх}} = \text{const}$, а конденсатор является идеальным (имеет минимальные диэлектрические потери). Тогда вольтметр, подключенный к конденсатору, может быть градуирован в значениях добротности. Последовательный контур входит в состав измерителя добротности или ку-метра (Q -метра), который применяется для измерения большинства параметров электрических цепей (L , C , $\text{tg } \delta$, Q , R). С его помощью добротность определяется прямым измерением, остальные параметры электрических цепей – расчетным путем методом замещения. Расчетное нахождение величин L , C , $\text{tg } \delta$, R является основным недостатком резонансного метода в отличие от мостового метода, в котором эти же самые величины находятся непосредственно в момент измерения.

Явление резонанса наиболее ярко проявляется на высоких частотах, поэтому резонансный метод используют преимущественно для измерения малых индуктивностей и емкостей, что также является одним из недостатков этого метода. Достоинством его является наглядность и простота настройки.

3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Закон Гейзенберга

В начале XX века стало ясно, что классическая физика непригодна при анализе явлений атомного масштаба. Какие же черты классического способа описания физических явлений делают его неприемлемым для описания микрообъектов, и где проходит граница применимости представлений классической физики?

Классическое описание физического процесса или явления характеризуется следующими абстракциями.

1. Предположение о независимости явлений от условий их наблюдения. Единственное обстоятельство, связанное с условиями наблюдения, которое учитывалось в классической физике, это выбор системы отсчета. По отношению к двум произвольно движущимся друг относительно друга системам отсчета одно и то же явление будет иметь различный вид. Физический процесс в инерциальной системе отсчета рассматривался как нечто происходящее независимо от наблюдения за этим процессом, а не как явление, конкретно познаваемое при помощи определенных средств исследования. Позднейшее развитие физики показало, что абсолютизация физических процессов не является логически необходимой, а представляет собой допущение, которое прекрасно оправдывалось при изучении макроскопических явлений, но которое оказалось совершенно непригодным в микромире. Действительно, классическая физика имела дело с телами крупного масштаба, по отношению к которым воздействие, связанное с измерением, играло совершенно ничтожную роль. В тех случаях, когда оно было заметным, его можно было учесть и внести соответ-

ствующие поправки. Принципиальная возможность этого никогда не вызывала сомнений.

2. Вторая абстракция, допускавшаяся в классической физике, была тесно связана с первой и заключалась в том, что при изучении физических явлений считалась возможной сколь угодно подробная детализация описания этих явлений. Другими словами, считалось, что можно неограниченно уточнять наблюдение и наблюдать разные стороны одного и того же физического процесса, не нарушая самого явления.

С этими двумя абстракциями, используемыми в классической физике, с предположениями об абсолютном характере физических процессов (их независимости от условий наблюдения) и о возможности сколь угодно детального их описания (в пределе – исчерпывающе точного и всестороннего), связано понятие о лапласовском механическом детерминизме, согласно которому можно определить состояние исследуемой системы в любой момент времени, если известно ее начальное состояние.

Вопрос о применимости классического способа описания – это вопрос о возможности использования перечисленных абстракций при анализе конкретного явления. Если в каком-то конкретном случае установлено, что эти абстракции неприменимы, то классическое описание невозможно и, следовательно, бессмысленны классические представления о свойствах изучаемого объекта, например, о его движении по определенной траектории.

Пределы применимости представлений классической физики, то есть классического способа описания явлений микромира, устанавли-

ваются так называемыми соотношениями неопределенностей Гейзенберга. Рассматривая различные способы измерения положения и импульса частицы, В. К. Гейзенберг пришел к выводу о том, что условия, благоприятные для точного измерения положения частицы, неблагоприятны для точного измерения ее импульса и наоборот. Одно из соотношений Гейзенберга связывает между собой неопределенности в значениях координаты частицы x и соответствующей компоненты импульса p_x в один и тот же момент времени:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h. \quad (3.1)$$

Величины Δx и Δp_x неправильно было бы понимать только как неточности одновременного измерения величин x и p_x , поскольку сам термин "неточность" как бы предполагает, что существуют и "точные" значения x и p_x , но только они почему-то не могут быть измерены. На самом деле невозможность точного измерения является следствием того, что частица по своей природе не имеет одновременно точного значения координаты и соответствующей проекции импульса. Эта невозможность есть проявление корпускулярно-волновой природы материальных микрообъектов. Аналогичные соотношения справедливы и для других координат и компонент импульса:

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h; \quad (3.2)$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq h. \quad (3.3)$$

При измерениях в микроскопических масштабах даже самая совершенная и точная аппаратура будет давать результаты, которые принципиально имеют статистическую природу. Повторение измерений в одних и тех же условиях будет давать разные значения измеряемой величины. Каждое значение будет появляться с той или иной

вероятностью, зависящей от способа измерения. Сам процесс измерения может воздействовать на физическую систему таким образом, что одновременно определить две сопряженные переменные можно лишь с конечной точностью, которая задается соответствующим соотношением неопределенностей.

Мерой разброса результатов измерений является среднеквадратичное отклонение σ получаемого распределения. В таком контексте эту величину называют "неопределенностью Δ ". Таким образом, неопределенность координаты равна

$$\Delta x = \sigma_x. \quad (3.4)$$

Соотношение неопределенностей для координаты и сопряженной ей переменной – компоненты импульса p_x – имеет вид

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2. \quad (3.5)$$

В связи с тем, что постоянная Планка $h = 2\pi\hbar$ чрезвычайно мала, то выражение при макроскопических измерениях лишено практического смысла. Неопределенность координаты и импульса, которая следует из (3.5), лежит далеко за пределами достижимой точности экспериментов.

Аналогично выражению (3.5) формулируется соотношение неопределенностей для другой пары сопряженных величин – энергии и времени:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar / 2. \quad (3.6)$$

Это соотношение связывает неопределенность энергии атомной системы $\Delta E = \sigma_E$ с неопределенностью времени $\Delta t = \sigma_t$, в течение которого измеряется энергия.

Если применить соотношение неопределенностей между энергией и временем к спонтанному распаду в системах, находящихся в квазистационарных состояниях, то экспоненциальное распределение измеренных значений времени распада даст величину стандартного отклонения, которая равна среднему значению \bar{t} . Эту величину называют средним временем жизни τ состояния:

$$\tau = \bar{t} = \sigma_t = \Delta t. \quad (3.7)$$

В этом случае неопределенность энергии квазистационарного состояния равна

$$\Delta E \geq \hbar / 2\tau. \quad (3.8)$$

Для квазистационарных состояний с $\Delta E \ll E$ выражение (3.8) переходит в приближенное равенство, тогда можно ввести еще одну часто используемую величину – ширину уровня $\Gamma = 2\Delta E$. И выражение (3.8) приобретает вид

$$\Gamma\tau = \hbar. \quad (3.9)$$

В такой форме соотношение неопределенностей играет большую роль в атомной и ядерной физике.

Пусть при распаде испускается квант с энергией $\hbar\omega$, а конечная ширина уровня описывается спектральным распределением интенсивности $p(\omega)$ электромагнитных волн. Тогда если обозначить символом γ профиль спектральной линии, то $\Gamma = 2 \hbar\Delta\omega = \hbar\gamma$ и соотношение (3.9) переходит в (3.10)

$$\gamma\tau = 1. \quad (3.10)$$

Профиль спектральной линии описывается распределением Лоренца

$$p(\omega, \omega_0, \gamma) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma/2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (3.11)$$

Из (3.11) следует, что γ – это ширина линии на половине ее высоты; она называется естественной шириной линии. При переходах между двумя состояниями с энергетической шириной Γ_1 и Γ_2 спектральная ширина линии равна

$$\gamma = (\Gamma_1 + \Gamma_2) / \hbar. \quad (3.12)$$

Таким образом, уравнение (3.10) описывает фундаментальное свойство волн: оно связывает между собой конечную продолжительность ограниченного волнового пакета с его спектральной шириной. С помощью преобразования Фурье получим для бездисперсионных волн

$$\gamma\tau = K, \quad (3.13)$$

где K – постоянная порядка единицы. Точное значение K зависит от конкретной формы волнового пакета.

Применим соотношение (3.6) к монохроматическим электромагнитным волнам. Для полного описания волны нужно измерить как ее амплитуду, так и фазу ϕ , причем $\phi = \omega t$.

Неопределенность фазы $\Delta\phi$ связана с неопределенностью продолжительности измерения Δt :

$$\Delta\phi = \omega \cdot \Delta t. \quad (3.14)$$

При измерении амплитуды нужно определить число фотонов N , прошедших через точку измерения за промежуток времени Δt . Используя соотношение $E = N \hbar \omega$, получим неопределенность энергии

$$\Delta E = \hbar \omega \cdot \Delta N. \quad (3.15)$$

Отсюда получим соотношение неопределенностей для числа фотонов и фазы электромагнитной волны

$$\Delta N \cdot \Delta \phi \geq 1/2. \quad (3.16)$$

Соотношение (3.16) определяет абсолютную границу точности измерения электромагнитных сигналов, особенно в оптической области, где в отличие от радиочастотного диапазона при той же мощности излучения, из-за большой энергии квантов число фотонов, фиксируемых за характерное время измерения Δt , а значит и неопределенность ΔN не намного больше единицы. Поэтому неопределенность фазы велика. Состояние когерентных электромагнитных волн определено с максимальной точностью, и для них в соотношении (3.16) стоит знак равенства.

3.2. Шумы

При измерениях макроскопических величин максимальная точность ограничена статистическими флуктуациями от среднего значения. Если эти флуктуации нельзя уменьшить при фиксированных внешних условиях, то их обычно называют шумами. Причины появления шумов можно разделить на три группы:

- тепловые колебания при ненулевой температуре;
- корпускулярная природа вещества и электричества;
- соотношения неопределенностей квантовой механики.

3.2.1. Влияние броуновского движения на показания гальванометра

Причины появления шумов можно разделить на 3 группы, одна из которых – тепловые колебания при ненулевой температуре. На

примере гальванометра со световым указателем рассмотрим влияние тепловых колебаний на электромеханические системы.

Электромеханические приборы относятся к приборам прямого преобразования. Основными функциональными частями этих приборов являются: измерительная цепь (ИЦ), измерительный механизм (ИМ) и отсчетное устройство (ОУ).



Рис. 3.1. Структурная схема электромеханического прибора

В ИЦ происходит преобразование входного сигнала x в одну или две промежуточные электрические величины y_1 и y_2 (например, токи I_1 и I_2 или напряжение U), которые воздействуют на ИМ. ИЦ может служить для расширения пределов измерений и компенсации погрешностей. В некоторых приборах, например комбинированных, элементы ИЦ занимают основную часть объема прибора.

В ИМ происходит преобразование электромагнитной энергии, обусловленной наличием промежуточных величин y_1 и y_2 , в механическую, в результате чего создается вращающий момент $M_{вр}$ и происходит поворот подвижной части ИМ в сторону возрастающих показаний на угол α . В зависимости от принципа действия ИМ применяются следующие группы (системы) приборов: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, электростатическая, индукционная.

Принцип действия ИМ различных групп приборов основан на взаимодействии: для магнитоэлектрических ИМ – магнитных полей

постоянного магнита и проводника с током; для электромагнитных – магнитного поля, создаваемого проводником с током, и ферромагнитного сердечника; для электродинамических (и ферродинамических) – магнитных полей двух систем проводников с токами; для электростатических – двух систем заряженных электродов; для индукционных – переменного магнитного поля проводника с током и индуцированных этим полем вихревых токов в подвижном элементе (например, в алюминиевом диске счетчика электрической энергии переменного тока).

Отсчетные устройства служат для визуального отсчитывания значений измеряемой величины. В электромеханических показывающих приборах они состоят из шкалы и указателя.

Световой указатель – это указатель в виде луча света, образующий на шкале световое пятно с индексом, по которому производят отсчет показаний. На рис. 3.2 показана упрощенная схема ОУ со световым указателем. Луч света от лампы накаливания 1, через конденсор 2, диафрагму 3, зеркало 4 и объектив 5 попадет на зеркальце 6 подвижной части и, отразившись от него (через промежуточные зеркала, не показанные на схеме), попадает на шкалу 7 в виде светового пятна 8 с индексом. Путем многократного отражения от зеркал можно получить большую длину светового луча и этим увеличить чувствительность прибора.

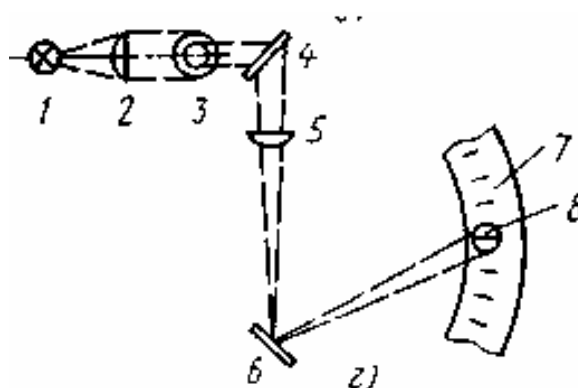


Рис. 3.2. Упрощенная схема ОУ со световым указателем:
1 – лампы накаливания; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4 – зеркало;
5 – объектив; 6 – зеркало; 7 – шкала; 8 – световое пятно.

Существуют высокочувствительные приборы такого типа для измерения сверхмалых токов. Их высокая чувствительность связана с тем, что выносная шкала может располагаться на большом расстоянии от подвижной части механизма. Положение светового пятна на шкале легко фиксируется наблюдателем. Поскольку механическая часть такого гальванометра находится на воздухе, то молекулы газа окружающей атмосферы бомбардируют в результате своего теплового (броуновского) движения подвижные части гальванометра и вызывают случайные колебания зеркала. Однако усредненный по времени вращающий момент равен нулю.

Если гальванометр находится в термическом равновесии с окружающим воздухом, то для подвижной системы с одной степенью свободы выполняется известный из статистической механики закон равнораспределения энергии по степеням свободы.

Средняя потенциальная энергия

$$\overline{E}_{\text{пот}} = \frac{1}{2} D \overline{\varphi^2(t)} = \frac{1}{2} kT, \quad (3.17)$$

где D – момент инерции гальванометра; ϕ – угол отклонения от нулевого положения $\overline{\phi} = 0$; k – постоянная Больцмана.

Средний квадрат флуктуаций угла отклонения равен

$$\overline{\phi^2(t)} = kT/D. \quad (3.18)$$

Таким образом, электрический ток можно уверенно зафиксировать только в том случае, если вызванное им отклонение гальванометра превышает термические флуктуации. Следовательно, минимальная сила тока, которую с помощью данного гальванометра можно зафиксировать, определяется как ток $I_{\text{мин}}$, вызывающий отклонение на угол, равный корню из среднего квадрата флуктуационных отклонений.

Пользуясь соотношением для гальванометра

$$D\phi = GI, \quad (3.19)$$

где G – динамическая константа гальванометра, получим

$$I_{\text{мин}} = \frac{D}{G} \sqrt{\overline{\phi^2}} = \sqrt{kTD}/G. \quad (3.20)$$

Приведенные в данном параграфе рассуждения можно применить и к другим электромеханическим системам, например, к мембране микрофона или к пьезоэлектрическому преобразователю.

3.2.2. Тепловой шум

Неупорядоченное тепловое движение атомных частиц вызывает и тепловой шум во всех электрических проводниках.

Тепловое перемещение носителей заряда вызывает статистические колебания плотности заряда в проводнике. Поэтому между кон-

цами проводника возникает быстро флуктуирующее напряжение U_R – напряжение шума.

Резистором называется электронное устройство, для которого выполняется закон Ома: $U = I \cdot R$.

Эквивалентная электрическая схема реального сопротивления будет состоять из идеального сопротивления R , в котором нет шумов, включенного последовательно с источником напряжения шума.

Рассмотрим проводник большой длины L с нулевым сопротивлением. Вся система находится при температуре T в термодинамическом равновесии со своим окружением. Раскладывая напряжение шума на фурье-компоненты и используя второй закон термодинамики, получим, что общая энергия волн в проводнике, приходящаяся на интервал $\Delta\nu$, равна

$$E_\nu \cdot \Delta\nu = 2P_\nu \cdot \Delta\nu \cdot L / v, \quad (3.21)$$

где E_ν – энергия волн, приходящаяся на интервал $\Delta\nu$; $2P_\nu \Delta\nu$ – средняя мощность теплового шума для волн, испускаемых источниками в интервале частот $\Delta\nu$; L – длина проводника; v – скорость перемещения волны вдоль проводника.

Если теперь накоротко соединить оба конца проводника, то при отсутствии потерь энергия электромагнитных волн будет оставаться постоянной. Это справедливо, в частности, для собственных колебаний в проводнике в интервале $\Delta\nu$. Геометрические условия для стоячих волн определяют набор частот ν :

$$n \frac{\lambda}{2} = n \frac{v}{2\nu} = L, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.22)$$

Число стоячих волн в интервале от ν до $(\nu + \Delta\nu)$ равно

$$\Delta n = \frac{2L}{v} \Delta \nu. \quad (3.23)$$

В условиях термодинамического равновесия среднее число фотонов \bar{N} в данном состоянии подчиняется распределению Бозе-Эйнштейна

$$\bar{N} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (3.24)$$

поэтому энергия в проводнике, приходящаяся на интервал частот $\Delta \nu$, равна

$$E_\nu \cdot \Delta \nu = \bar{N} h \nu = \frac{\Delta n h \nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \cdot \Delta \nu. \quad (3.25)$$

Соотношения (3.22) и (3.24) позволяют вычислить мощность тепловых шумов в проводнике с данным сопротивлением:

$$P_\nu \cdot \Delta \nu = \frac{h \nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \cdot \Delta \nu. \quad (3.26)$$

Из выражения (3.26) видно, что эта мощность не зависит от величины сопротивления R . На рис. 3.3 показано нормированное спектральное распределение плотности мощности шума P_ν/kT при разных $h\nu/kT$. Если $h\nu \ll kT$, то мощность шумов не зависит от частоты. В этом случае принято говорить о белом шуме.

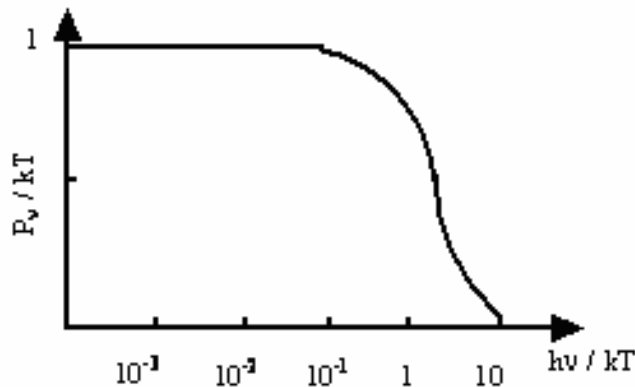


Рис. 3.3. Нормированное спектральное распределение мощности шума P_v / kT

Отклонения от горизонтали на рис. 3.3 пренебрежимо малы при частотах меньше $h\nu_{\text{макс}} \approx kT/10$, что при комнатной температуре соответствует максимальной частоте $\nu_{\text{макс}} \approx 660$ ГГц.

Эффективное напряжение шума $U_{R\text{эфф}}$ в сопротивлении R определяется усреднением по времени квадрата напряжения:

$$U_{R\text{эфф}}^2 = \overline{U_R^2(t)}. \quad (3.27)$$

Оно вызывает эффективный ток $I_{R\text{эфф}} = U_{R\text{эфф}} / 2R$. Опуская математические выкладки, получим

$$U_{R\text{эфф}}^2 = 4kTR \cdot \Delta\nu \frac{h\nu/kT}{e^{h\nu/kT} - 1}; \quad (3.28)$$

$$U_{R\text{эфф}}^2 = 4kTR \cdot \Delta\nu, \quad h\nu \ll kT. \quad (3.29)$$

Последнее уравнение (3.29) обычно называют формулой Найквиста. Спектральное распределение мощности шумов (спектральная функция плотности) выглядит как

$$W_U(\nu) = \frac{U_{R\text{эфф}}^2}{\Delta\nu} = 4kTR. \quad (3.30)$$

Численный пример теплового шума: входное сопротивление осциллографа равно $R = 1$ МОм. При полосе частот $\Delta\nu = 100$ МГц эффективное напряжение шума на этом сопротивлении составит для комнатной температуры $U_{R\text{эфф}} = 1.3$ мВ.

Из примера видно, что тепловой шум влияет на передающие характеристики частей любого измерительного устройства, содержащего сопротивления.

3.2.3. Дробовой эффект

Данный вид шумов, так же как и тепловой шум, вызван дискретной природой носителей заряда. Если по сопротивлению течет постоянный ток, то среднее число носителей заряда, протекающее по нему в единицу времени, постоянно. Однако в каждый момент времени число носителей заряда изменяется. Это вызывает флуктуации тока. Такое явление называется дробовым эффектом по аналогии с ударами дроби, падающей на металлическую пластину. Соответствующий шум называют дробовым шумом.

В наиболее простом виде этот эффект наблюдается в вакуумном диоде с плоскими электродами (рис. 3.4).

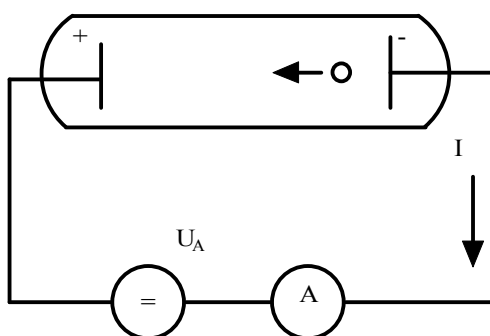


Рис. 3.4. Вакуумный диод с плоскими электродами

Электрическое поле между анодом и катодом постоянно. Электроны вылетают с нагретого катода, имея пренебрежимо малую скорость. Однако их скорость линейно растет со временем. Ток, вызванный движением электрона во внешней цепи:

$$I_k(t) = ef(t - t_k) = \begin{cases} \frac{2l}{\tau^2}(t - t_k) & \text{при } t_k \leq t \leq t_k + \tau; \\ 0 & \text{при } t < t_k \text{ и } t > t_k + \tau, \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\int_{t_k}^{t_k + \tau} I_k dt = e, \quad \int_{t_k}^{t_k + \tau} f(t - t_k) dt = 1. \quad (3.32)$$

Продолжительность импульса тока τ равна времени пролета электрона от катода к аноду. Форма импульса тока одинакова для всех электронов, поэтому общий ток в момент времени t определяется как

$$I(t) = \sum_k I_k = e \sum_k f(t - t_k). \quad (3.33)$$

Электроны вылетают с горячего катода статистически, независимо друг от друга, поэтому моменты вылета электронов t_k и, следовательно, моменты возникновения импульсов $f(t - t_k)$ подчиняются распределению Пуассона. Разложим ток $I(t)$ на постоянную I_0 и шумовую $I_s(t)$ составляющие

$$I(t) = I_0 + I_s(t). \quad (3.34)$$

Тогда усреднение по времени даст:

$$\overline{I(t)} = I_0 \quad \text{и} \quad \overline{I_s(t)} = 0. \quad (3.35)$$

Если усреднить по времени квадрат тока, то мы получим

$$\overline{I^2(t)} = I^2 + \overline{I_s^2(t)}. \quad (3.36)$$

Теорема Кемпбелла позволяет выразить среднее значение по статистически независимой последовательности импульсов через соответствующие средние величины для отдельного импульса. Если \bar{z} — средняя скорость следования импульсов (число импульсов в секунду), то

$$I_0 = \overline{I(t)} = \bar{z} \int_{t_k}^{t_k + \tau} e f(t - t_k) dt = \bar{z} e; \quad (3.37)$$

$$\overline{I_s^2(t)} = \bar{z} \int_{t_k}^{t_k + \tau} e^2 f^2(t - t_k) dt \quad (3.38)$$

С учетом выражения (3.22) для диода можно записать

$$\overline{I_s^2(t)} = \frac{4}{3} \frac{\bar{z}e}{\tau} = \frac{4}{3} \frac{e}{\tau} I_0. \quad (3.39)$$

Чем короче длительность импульса, тем выше средний квадрат флуктуаций. На практике выражение (3.39) не имеет большого значения, поскольку для его проверки нужно проводить измерение с достаточно большим разрешением по времени или для проверки всего спектра шумовых токов.

Если выразить величину тока с помощью его амплитудного спектра, выполнить преобразование Фурье для отдельного импульса и с помощью теоремы Парсеваля выразить средний квадрат флуктуаций через интеграл по квадрату амплитудного спектра, то можно непосредственно определить эффективный шумовой ток $I_{S_{эфф}}$ для интервала частот от ν до $(\nu + \Delta\nu)$:

$$\overline{I_s^2(t)} = I_{S_{эфф}}^2 = 2eI_0 |F(\nu)|^2 \cdot \Delta\nu. \quad (3.40)$$

Таким образом, частотная зависимость определяется только формой отдельного импульса тока $f(t - t_k)$. Для низких частот $[\nu \ll (2\pi\tau)^{-1}]$ получается так называемое уравнение Шотки:

$$I_{S_{эфф}}^2 = 2eI_0 \cdot \Delta\nu, \quad \nu \ll 1/2\pi\tau. \quad (3.41)$$

Эффективный шумовой ток не зависит при этих частотах от частоты (так называемый белый шум). Он зависит от величины тока, ширины частотной полосы и величины заряда, который переносится каждым носителем. В отличие от теплового шума в сопротивлениях,

который зависит от температуры, на дробовой шум внешние условия никак не влияют.

3.2.4. Квантовый шум

Если дискретная природа носителей заряда вызывает дробовой шум, то квантование электромагнитного излучения тоже приводит к флуктуациям “потока” фотонов. Рассмотрим идеальный детектор с квантовым выходом $\eta = 1$ (например, фотоячейку, с катода которой каждый фотон выбивает один электрон). В нем распределение падающих фотонов может преобразовываться в соответствующее распределение импульсов тока. Таким образом, мы можем экспериментально регистрировать флуктуации электромагнитного излучения.

Рассмотрим теперь бесконечно длинную монохроматическую волну – так называемую когерентную волну. С точки зрения классической физики ее амплитуда и фаза не меняются со временем и не испытывают никаких флуктуаций. При измерениях в течение одинаковых промежутков времени Δt и фиксированной мощности излучения P_0 мы будем ожидать одного и того же среднего числа фотонов

$$\bar{N} = \frac{P_0 \cdot \Delta t}{h\nu}. \quad (3.42)$$

Однако наблюдаемое число фотонов флуктуирует в соответствии с распределением Пуассона. Предполагая, что фотоны представляют собой классические не взаимодействующие друг с другом частицы, стандартное отклонение числа фотонов можно записать как

$$\sigma_N = \sqrt{N} = \sqrt{\frac{P_0 \cdot \Delta t}{h\nu}}. \quad (3.43)$$

Ток так называемых фотоэлектронов в идеальном детекторе будет подчиняться такому же распределению Пуассона. Поэтому усредненные флуктуации тока будут описываться уравнением Шотки для дробового шума. Средний фототок равен

$$I_0 = e \frac{\bar{N}}{\Delta t} = \frac{eP_0}{h\nu}. \quad (3.44)$$

Точно так же можно получить квадрат эффективного шумового тока

$$I_{S_{\text{эфф}}}^2 = 2eI_0 \cdot \Delta\nu = \frac{2e^2P_0}{h\nu} \cdot \Delta\nu. \quad (3.45)$$

Отношение сигнал-шум S/N принято определять через отношение соответствующих мощностей:

$$\frac{S}{N} = \frac{I_0^2}{I_{P_{\text{эфф}}}^2}. \quad (3.46)$$

Применительно фототока выражение (3.46) переходит в (3.47)

$$\frac{S}{N} = \frac{P_0}{2h\nu \cdot \Delta\nu}. \quad (3.47)$$

Если считать, что в идеальном детекторе не возникают собственные шумы, то независимо от постоянной мощности падающего излучения P_0 эквивалентная мощность шума $P_{R_{\text{эфф}}}$ на детекторе составляет

$$P_{R_{\text{эфф}}} = 2h\nu \cdot \Delta\nu. \quad (3.48)$$

Выражение (3.48) описывает случай непосредственного приема сигнала. Существуют способы (например, гетеродинный) уменьшения шума вдвое и даже в четыре раза (гомодинный).

В отличие от теплового шума, уровень которого понижается при высоких частотах, квантовый шум возрастает с частотой. В области

($h\nu/kT > 1$) он начинает преобладать над тепловым шумом. При комнатной температуре данное условие соответствует оптической и инфракрасной областям спектра. Для описания шумов вводят так называемую шумовую температуру T_R . При этой температуре мощность теплового шума в проводнике равна мощности квантового шума. Приравнивая выражения (3.26) и (3.48), получим формулу для T_R

$$T_R = \frac{h\nu}{k \ln(3/2)}. \quad (3.49)$$

Из выражения (3.49) следует, что в оптической области квантовый шум при $\lambda = 500$ нм соответствует шумовой температуре $T_R = 70\,000$ К.

Минимальная мощность излучения, которую еще можно зарегистрировать, должна соответствовать $S/N = 1$. Иными словами, для ее непосредственного приема с помощью идеального детектора справедливо соотношение

$$P_{0\text{мин}} = P_{R\text{эфф}} = 2h\nu \cdot \Delta\nu. \quad (3.50)$$

Эта мощность всего в 2 раза превышает предел, который получается из соотношения неопределенностей. Иными словами, уравнение (3.50) означает, что за время $\Delta t \approx 1/2 \Delta\nu$ должен быть зарегистрирован в среднем один фотон.

Большинство источников света испускают так называемое тепловое излучение. Оно некогерентно. В этом случае флуктуации существенно выше, чем у когерентных источников (лазеров и мазеров):

$$\sigma_N^2 = \bar{N}^2 + \bar{N}. \quad (3.51)$$

Такие флуктуации вызывают и более значительные шумы в детекторе.

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

4.1. Измерительные преобразования и измерительные преобразователи

Измерительное преобразование представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Любое измерительное устройство использует те или иные функциональные связи (разной степени сложности). Поэтому применение измерительных преобразований является единственным методом практического создания любых измерительных устройств.

Условно физические величины можно разделить на два класса: электрические и неэлектрические. Способам преобразования, преобразователям и методам измерения электрических величин посвящены значительные части учебных курсов «Электротехника» и «Общая физика». Тем не менее, согласно данным табл. 1 более 90 % видов измерений параметров производственных процессов и продукции связано с измерением неэлектрических величин.

В большинстве случаев целесообразно измерять неэлектрические величины электрическими приборами. Это вызвано следующими причинами:

1. электрические величины легче, чем неэлектрические, передавать на большие расстояния;
2. над электрическими величинами можно проводить различные математические операции, что позволяет автоматически вводить поправки, интегрировать и дифференцировать результаты и т.д.;
3. электрические величины легко регистрировать;

4. широкий динамический диапазон измерения электрических величин²;

5. малая инерционность электрической аппаратуры, т.е. широкий частотный диапазон.

Электрические приборы для измерения неэлектрических величин обязательно содержат измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую. Измерительный преобразователь устанавливает однозначную функциональную зависимость выходной электрической величины от измеряемой входной неэлектрической величины (температуры, перемещения, силы, давления и т.д.).

Преобразование неэлектрических величин в электрические может осуществляться двумя способами:

1. активным преобразованием энергии одного вида в энергию другого вида, в результате чего вырабатываются электрические величины: напряжение, ток, заряд;

2. воздействием на электрические величины (пассивное преобразование), требующим вспомогательной энергии:

а) на основе непосредственного применения физических зависимостей (в частности, могут быть использованы зависимости от измеряемой величины таких физических величин, как сопротивление, проводимость, магнитная и диэлектрическая проницаемости, индуктивность, электрическая емкость, интенсивность зарядов и излучений);

² Использование электроники позволяет в тысячи раз усиливать электрические сигналы, и, следовательно, во столько же раз увеличивать чувствительность аппаратуры. Для увеличения соотношения сигнал/шум существуют специальные методы.

б) путем механических воздействий (эти воздействия позволяют изменять такие величины, как сопротивление, индуктивность, емкость);

в) методом компенсации (компенсацию можно осуществлять вручную или автоматически).

Неэлектрические физические величины можно также преобразовывать в другие, не только электрические величины.

Измерительный преобразователь – это техническое устройство, построенное на определенном физическом принципе действия, выполняющее одно частное измерительное преобразование.

На том же физическом принципе действия могут быть созданы и не измерительные, а энергетические преобразователи, предназначенные для преобразования потоков энергии. В отличие от измерительных такие преобразователи обычно называются силовыми (силовой трансформатор, силовой выпрямитель и т.д.). Главное требование к энергетическим преобразователям – высокое значение энергетического к.п.д., т.е. малые потери при передаче энергии. Основное требование к измерительным преобразователям – точная передача информации, иначе говоря, минимальные погрешности.

Понятие “измерительный преобразователь” значительно более узкое, более конкретное, чем понятие “измерительное преобразование”, т.к. одно и то же измерительное преобразование может быть выполнено целым рядом различных по принципу действия измерительных преобразователей. Пример: преобразование температуры в механическую величину:

- температура→жидкостный термометр→перемещение,

- температура→термопара→ЭДС→магнитоэлектрический прибор →перемещение.

Датчиком прибора для измерения той или иной физической величины называется конструктивная совокупность ряда измерительных преобразователей, размещенных непосредственно у объекта измерения.

Метод измерения – это совокупность отдельных преобразований, необходимых для восприятия информации о размере измеряемой величины и преобразования ее в такую форму, которая необходима получателю информации (человеку, машине).

На рис. 4.1 показана упрощенная схема электрического прибора для измерения неэлектрической величины.



Рис. 4.1 Универсальная схема прибора для измерения неэлектрических величин

Измеряемая неэлектрическая величина X подается на вход измерительного преобразователя. Выходная электрическая величина Y преобразователя измеряется электрическим измерительным устройством (ЭИУ). Обычно шкала ЭИУ градуируется в единицах неэлектрической величины.

Широко применяются электрические приборы, в которых измеряемая неэлектрическая величина подвергается нескольким последовательным преобразованиям. В качестве предварительных преобразователей часто используют неэлектрические измерительные механиз-

мы, преобразующие измеряемую неэлектрическую величину в перемещение подвижной части этих механизмов. Перемещение подвижной части преобразуется измерительным преобразователем в электрическую величину.

4.2. Характеристики измерительных преобразователей неэлектрических величин

Зависимость выходной величины измерительного преобразователя Y от входной X в общем виде выражается уравнением преобразования $Y = F(X)$. Функция преобразования $F(X)$ для некоторых ИП известна, а для других ее приходится находить экспериментально, т.е. прибегать к градуировке ИП. Результаты градуировки выражаются в виде таблиц, графиков или аналитически.

При оценке и сравнении ИП необходимо учитывать их следующие основные характеристики:

1. Постоянство во времени функции преобразования. При изменении с течением времени функции преобразования приходится повторять градуировку, что крайне нежелательно, а в некоторых случаях невозможно.

2. Вид функции преобразования. Обычно наиболее желателен линейный характер зависимости $Y = F(X)$. Многозначность или разрыв функции преобразования указывают на непригодность ИП для работы в данном интервале изменения измеряемой величины.

3. Погрешность и чувствительность. Основная погрешность ИП – это погрешность при нормальных условиях, т. е. при номинальных значениях влияющих величин. Дополнительная погрешность ИП – это погрешность, обусловленная отклонением одной из влияющих

величин z (например, температура, влажность или давление окружающей среды) от номинального значения: $y = f(x) \rightarrow y = f(x, z)$.

4. Обратное воздействие преобразователя на измеряемую величину. (Термопара, терморезистор искажают температурное поле объекта исследования).

5. Динамические свойства преобразователя. При измерении входной величины в ИП возникает переходной процесс (не только связанный с инерционностью), характер которого зависит от наличия в преобразователе элементов, запасующих энергию (перемещающиеся детали, катушки индуктивности, конденсаторы, детали, обладающие теплоемкостью). Переходной процесс проявляется также в виде инерции – запаздывания реакции ИП на изменение входной величины.

4.3. Классификация преобразователей

Существующие преобразователи неэлектрических величин можно классифицировать по различным признакам. Наиболее часто, особенно в учебных целях, классификацию ведут по физическому принципу, заложенному в основу построения датчиков преобразователей физических величин. Выделяют 8 групп:

1. *Резистивные датчики*. В основу построения их заложено преобразование измеряемой физической величины в изменение омического сопротивления. При этом измеряемая механическая величина предварительно преобразовывается в перемещение (деформацию). В группе резистивных датчиков обычно выделяют реостатные, тензометрические и контактные.

2. *Электромагнитные датчики.* К этой группе относятся датчики, использующие взаимодействие магнитных потоков, создаваемых протекающим по контурам электрическим током. Электромагнитные датчики, в свою очередь подразделяются на индуктивные, взаимноиндуктивные, магнитоупругие и индукционные.

3. *Пьезоэлектрические датчики.* Эти датчики основаны на использовании пьезоэффекта, при котором осуществляется преобразование динамического усилия в электрический заряд. Существуют датчики, использующие обратный пьезоэффект. Пьезоэлектрические датчики по физическому принципу действия иногда относят к электростатическим, так как информационным параметром является электростатический заряд.

4. *Электростатические датчики.* Они основаны на взаимодействии двух заряженных тел. К таким датчикам относят, например, емкостные, позволяющие регистрировать различные механические усилия, уровень жидкости, состав веществ и др.

5. *Гальваномагнитные датчики.* Эти датчики основаны на гальваномагнитном эффекте, сущность которого заключается в изменении электрических параметров преобразователей под действием магнитного поля или появления ЭДС. Такие датчики бывают магниторезистивного типа или основаны на эффекте Холла.

6. *Электрохимические датчики.* К этой группе относятся электрохимические резистивные датчики, гальванические, полярографические, электрокинетические и химотронные преобразователи. Принцип действия этих датчиков основан на зависимости параметров электролитического преобразователя от состава и концентрации,

температуры и других свойств раствора, а также зависимость электрической разности потенциалов на границе раздела твердой и жидкой фаз от скорости перемещения раствора.

7. *Тепловые датчики.* Принцип работы этих датчиков основан на использовании физических закономерностей, определяемых тепловыми процессами. К этим датчикам относятся датчики термохимического, терморезистивного и термоэлектрического типов.

8. *Оптоэлектрические датчики.* Основаны на преобразовании оптических излучений в электрический сигнал. В зависимости от длин волн и интенсивности воспринимаемых оптических лучей эти датчики позволяют регистрировать яркость света, температуру веществ, спектральный состав оптических излучений, состав веществ и др.

Как указывалось ранее, в зависимости от вида выходного сигнала все датчики подразделяются на активные (генераторные) и пассивные (параметрические). Генераторные датчики под воздействием измеряемого физического параметра вырабатывают электрическую энергию. Параметрическими называют датчики, которые под воздействием измеряемой величины меняют какие-либо электрические параметры. В частности, к таким параметрам относят сопротивление (активное или реактивное), фазовый сдвиг, масштабный коэффициент и др. Для использования датчиков параметрического типа требуется дополнительный источник опорного сигнала.

Еще один способ классификации – по разновидности измеряемых физических величин. Различают датчики линейных и угловых перемещений, усилий, крутящих моментов, давлений и напряжений,

параметров движения, температуры, концентрации веществ, излучения света и др. Такой способ классификации наиболее удобен для практических целей. Он используется в различных справочниках по измерительной технике.

Теперь перейдем к подробному рассмотрению преобразователей, используя при этом первую из трех классификаций.

4.4. Резистивные преобразователи механических величин

4.4.1. Контактные преобразователи

Существует две разновидности контактных преобразователей:

- переключательные;
- резистивные преобразователи силы.

Контактными переключательными называются измерительные преобразователи, в которых измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Естественной входной величиной преобразователей является пространственное перемещение.

Простейший переключательный преобразователь (рис. 4.2) является однопредельным и имеет одну пару контактов 4 и 5, замыкание которых происходит в зависимости от измеряемого перемещения, например изменения размера изделия 1.

При увеличении размера изделия шток 3 перемещается и укрепленный на нем контактирующий элемент 4 входит в соприкосновение с контактом 5. При этом активное сопротивление между контактами изменяется от бесконечности до малой величины, определяемой значением контактного сопротивления.

Конструктивно измерительный шток закрепляется на плоских пружинах 2. Погрешность срабатывания переключательных преобразователей составляет 1-2 мкм.

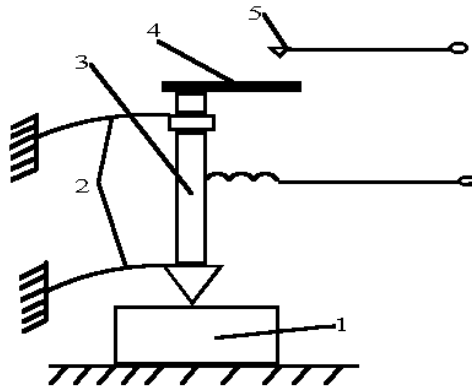


Рис. 4.2. Контактный переключательный преобразователь

Резистивные преобразователи силы – это преобразователи, в которых используется изменение переходного сопротивления контакта при различном усилии прижима. Из угольных пластинок толщиной около 1 мм набирают столбик, чтобы приложенное осевое усилие изменяло переходное сопротивление контакта, которое в основном и составляет активное сопротивление столба пластинок (рис. 4.3).

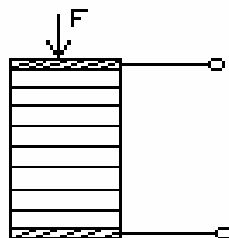


Рис. 4.3. Резистивный преобразователь силы

Для общего активного сопротивления столба справедливо выражение:

$$R_a = R_k + R_0 = R_0 + k/F_e, \quad (4.1)$$

где R_k – контактное сопротивление между пластинками; R_0 – сопротивление пластинок; k – коэффициент пропорциональности; F_e – сила.

Изменение сопротивления в зависимости от прикладываемой нагрузки можно представить в виде

$$\Delta R_a = -k \cdot \Delta F_e / [F_e(F_e + \Delta F_e)]. \quad (4.2)$$

Наряду с простотой конструктивного исполнения такие преобразователи характеризуются высокой чувствительностью. Однако им свойственны относительно большие погрешности измерений (нестабильность нуля, нестабильность, обусловленная старением).

Недостатком такой конструкции является низкая воспроизводимость и старение пластинок.

4.4.2. Реостатные измерительные преобразователи

Реостатные измерительные преобразователи представляют собой в простейшем случае реостат (рис. 4.4), щетка (движок) которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины.

Таким образом, естественной входной величиной реостатных преобразователей является перемещение движка, которое может быть либо угловым, либо линейным. Выходной величиной служит активное сопротивление, распределенное линейно или по некоторому закону по пути движка.

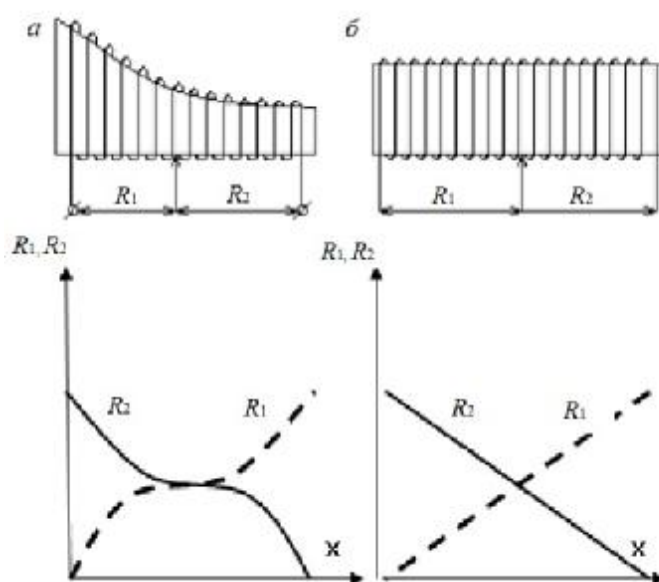


Рис. 4.4. Резистивные измерительные преобразователи и функциональные зависимости между перемещением и выходным сопротивлением

На рис. 4.5 показано устройство реостатного преобразователя, используемого для измерения углов. На каркас 1 из изоляционного материала намотана с равномерным шагом проволока 2. Изоляция проволоки на верхней грани каркаса зачищается, и по металлу проволоки скользит щетка 3. Добавочная щетка 5 скользит по токосъемному кольцу 4. Обе щетки изолированы от приводного валика 6.

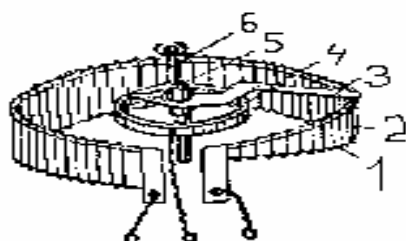


Рис. 4.5. Реостатный преобразователь

Реостатные преобразователи бывают как с проводом, намотанным на каркас, так и реохордного типа. Чаще всего применяют про-

вода из манганина, константана или фехраля. В случаях, когда требования к износостойкости контактной поверхности особенно высоки или когда значения контактного давления очень малы, применяют провод из сплава платины с иридием (90 % Pt + 10 % Ir). Добавка иридия к платине увеличивает твердость и прочность последней, повышает кислотоустойчивость, антикоррозийную и износостойкость.

Провод реостата должен быть покрыт либо эмалью, либо слоем окислов, изолирующих соседние витки друг от друга.

При работе реостатного преобразователя в условиях вибраций применяют щетки из проволок различной длины (от точки крепления до точки контактов) или из пластин с двумя-тремя надрезами. Этим обеспечивается разная собственная частота вибраций отдельных частей щетки.

Каркас реостатного преобразователя обычно выполняется из текстолита или пластмассы, применяются также каркасы из алюминия, покрытого или изоляционным лаком, или оксидной пленкой толщиной до 10 мкм, обладающей достаточно хорошими изоляционными свойствами.

Формы каркасов очень разнообразны: они могут быть в виде плоской или цилиндрической пластины, плоского или цилиндрического кольца, плоского сегмента и др.

Измерительные цепи, в которые включаются реостатные преобразователи, питаются преимущественно постоянным напряжением, но могут иметь и источники переменного напряжения. Напряжение питания преобразователя определяется его допустимой мощностью и сопротивлением. Наиболее распространенным является включение

преобразователя в виде управляемого делителя напряжения или включение преобразователя в измерительный мост.

4.4.3. Тензометрические преобразователи (тензорезисторы)

Принцип действия тензорезисторов основан на тензорезистивном эффекте, т. е. на изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. При деформации проводника изменяются его длина l и площадь поперечного сечения S . Деформация кристаллической решетки приводит к изменению удельного сопротивления ρ . Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника:

$$R = \rho l / S. \quad (4.3)$$

Основной характеристикой материала является коэффициент относительной тензочувствительности K_T . Он равен отношению относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины проводника:

$$K_T = \varepsilon_R / \varepsilon_l, \quad (4.4)$$

где $\varepsilon_R = \Delta R / R$ – относительное изменение сопротивления проводника; $\varepsilon_l = \Delta l / l$ – относительное изменение длины проводника, называемое также его деформацией.

Для приближенной оценки коэффициента тензочувствительности у проводниковых тензорезисторов возьмем в качестве активного материала ртуть. Важно, что она при комнатной температуре находится в жидком состоянии и, следовательно, при деформации не будет изменяться в объеме. Рассмотрим стержень из ртути длиной l и

площадью поперечного сечения S (рис. 4.6). Его сопротивление составит

$$R = \rho l/S. \quad (4.5)$$

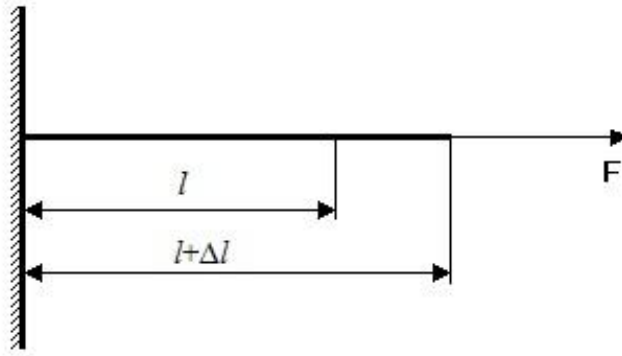


Рис. 4.6. Проводник из ртути под действием растягивающей силы F

Умножим числитель и знаменатель дроби на l :

$$R = \rho l^2/Sl. \quad (4.6)$$

Произведение Sl представляет собой объем стержня V , тогда

$$R = \rho l^2/V. \quad (4.7)$$

Продифференцируем (4.7) по длине l , учитывая наше допущение о неизменности объема стержня при деформации и пренебрегая одновременно изменениями его поперечного размера и удельного сопротивления:

$$\Delta R = 2\rho l \cdot \Delta l/V. \quad (4.8)$$

Далее разделим (4.8) на (4.7)

$$\Delta R/R = 2 \cdot \Delta l/l \quad (4.9)$$

и поделим обе части уравнения (4.9) на $\Delta l/l$. В результате в левой части получится выражение для коэффициента тензочувствительности, а в левой – его значение:

$$K_T = (\Delta R/R)/(\Delta l/l) = 2. \quad (4.10)$$

В неразрушающем контроле материалов и изделий широко используются проводниковые (фольговые, проволочные, пленочные) и полупроводниковые тензорезисторы.

Наилучшим материалом для температур ниже 450 К является константан. Зависимость сопротивления R от относительной деформации l с достаточной точностью описывается линейным двучленом: $R = R_0(l/K_T + 1)$, где R_0 – сопротивление тензорезистора без деформации. Тензочувствительность датчика из константана составляет примерно 2. Нелинейность функции преобразования не превышает 1 %.

Фольговые тензорезисторы представляют собой тонкую лаковую пленку, на которую нанесена фольговая тензочувствительная решетка из константана толщиной 4-12 мкм (рис. 4.7.)



Рис. 4.7. Фольговый тензорезистор

Решетка сверху покрыта лаком. Фольговые тензорезисторы нечувствительны к поперечной деформации вследствие малого сопротивления перемычек между тензочувствительными элементами.

Проволочный тензорезистор имеет аналогичную конструкцию, но решетка выполнена из константановой проволоки диаметром 20-50 мкм. Однако по метрологическим и эксплуатационным характеристикам лучше фольговые преобразователи. Номинальное сопротив-

ление фольговых и проволочных тензорезисторов составляет 100-800 Ом, полупроводниковых – 50-800 Ом.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой пластинку монокристалла кремния или германия длиной 5-10 мм, шириной 0,2-0,8 мм. Коэффициент тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов выше и находится в пределах 55-130. Недостатками полупроводниковых тензорезисторов являются большой разброс параметров, необходимость индивидуальной градуировки, сильная зависимость сопротивления от температуры.

На практике выделяют два основных направления использования тензорезисторов для измерения неэлектрических величин:

1) использование тензоэффекта в проводнике, находящемся в состоянии объемного сжатия. В таком случае естественной входной величиной преобразователя является давление окружающего его газа или жидкости. На этом принципе строятся манометры для измерения высоких и сверхвысоких давлений. Выходной величиной преобразователя является изменение его активного сопротивления;

2) использование тензоэффекта при растяжении и сжатии тензочувствительного материала. При этом тензорезисторы применяются в виде свободных и наклеиваемых преобразователей.

Свободные тензопреобразователи выполняются в виде одной или ряда проволок, закрепленных между подвижной и неподвижной деталями, как правило, выполняющих роль упругого элемента. Естественной входной величиной таких преобразователей является весьма малое перемещение подвижной детали.

Наиболее распространены наклеиваемые проволочные тензорезисторы (рис. 4.8). Такой преобразователь, будучи приклеенным к испытываемой детали, воспринимает деформации ее поверхностного слоя.

Естественной входной величиной наклеиваемого тензопреобразователя является деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации.

Наиболее часто используется неуравновешенный мост постоянного тока, в таком случае тензорезистивные преобразователи включаются дифференциально (рис. 4.9). При этом датчики помещаются на деталь так, что один из них подвергается растяжению (R_{T1}), а другой - сжатию (R_{T2}) (рис. 4.8). Выходное напряжение тензорезисторного моста обычно не превышает 10-20 мВ. Для повышения чувствительности тензорезисторные мосты используют совместно с усилителями.

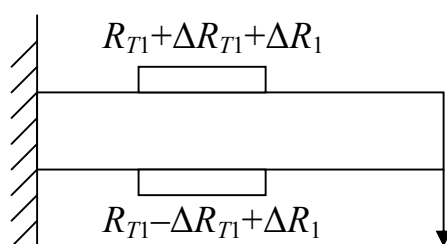


Рис. 4.8. Пример наклеенных тензодатчиков, верхний из которых подвергается деформации растяжения, нижний – сжатия.

R_{T1} и R_{T2} – сопротивления верхнего и нижнего датчика соответственно, ΔR_{T1} и ΔR_{T2} – изменения их сопротивлений при деформации, ΔR_1 и ΔR_2 – изменения сопротивлений, обусловленные колебаниями температуры деформируемой детали

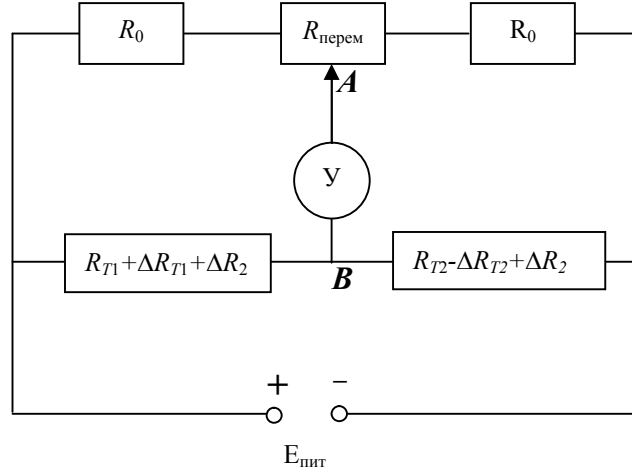


Рис. 4.9. Схема измерительного моста с дифференциально включенными проволочными тензорезисторами и уравнивающими элементами при питании постоянным током

В момент равновесия (при отсутствии деформации) уравнение баланса моста можно записать как

$$(R_0 + R_{\text{перем}}/2)R_{T2} = (R_0 + R_{\text{перем}}/2)R_{T1}. \quad (4.11)$$

Потенциалы в точках A и B относительно отрицательного полюса источника питания будут равны и составят при $R_{T1} = R_{T2}$:

$$\varphi_A = \varphi_B = E_{\text{пит}}/2 \quad (4.12)$$

При деформации изменится потенциал в точке B . Он станет равен:

$$\varphi_B = E_{\text{пит}}(R_{T2} + \Delta R_2 - \Delta R_{T2}) / (R_{T1} + \Delta R_1 + \Delta R_{T1} + R_{T2} + \Delta R_2 - \Delta R_{T2}).$$

При условии, что $\Delta R_1 = \Delta R_2$, $\Delta R_{T1} = \Delta R_{T2}$:

$$\varphi_B = E_{\text{пит}}(R_{T1} + \Delta R_1 - \Delta R_{T1}) / (2R_{T1} + 2\Delta R_1). \quad (4.13)$$

Рассчитаем напряжение разбаланса моста $U_{\text{разб}}$:

$$\begin{aligned} U_{\text{разб}} &= \varphi_A - \varphi_B = E_{\text{пит}}/2 - E_{\text{пит}}(R_{T1} + \Delta R_1 - \Delta R_{T1}) / (2R_{T1} + 2\Delta R_1) = \\ &= E_{\text{пит}} \cdot \Delta R_{T1} / (2R_{T1} + 2\Delta R_{T1}). \end{aligned} \quad (4.14)$$

Так как $R_{T1} \gg \Delta R_1$, то величиной ΔR_1 в знаменателе можно пренебречь, и выражение для напряжения разбаланса приобретет вид:

$$U_{\text{разб}} \approx E_{\text{пит}} \cdot \Delta R_{T1} / (2 R_{T1}) \quad (4.15)$$

$$U_{\text{разб}} = (E_{\text{пит}}/2) \cdot \Delta R_{T1} / R_{T1} = (E_{\text{пит}}/2) K_T \cdot \Delta l / l = (E_{\text{пит}}/2) K_T \varepsilon. \quad (4.16)$$

Таким образом, при дифференциальном включении тензорезисторов напряжение разбаланса прямо пропорционально деформации и не зависит от температуры испытываемой детали.

4.5. Электромагнитные преобразователи

Электромагнитный преобразователь представляет собой один или несколько контуров, находящихся в магнитном поле, которое может быть создано как током, протекающим по контурам, так и внешним источником.

4.5.1. Индуктивные, взаимдуктивные, магнитоупругие преобразователи

Индуктивность преобразователя во многом зависит от ферромагнитного материала, который вводится в магнитное поле контура. Электромагнитный преобразователь с ферромагнитным сердечником показан на рис. 4.10. Изменение его индуктивности происходит при изменении положения сердечника и входной величиной преобразователя является перемещение. Такой преобразователь называется индуктивным.

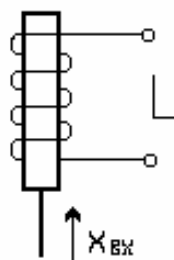


Рис. 4.10. Индуктивный преобразователь

Рассмотрим более общую конструкцию индуктивного преобразователя, представленную на рис. 4.11.

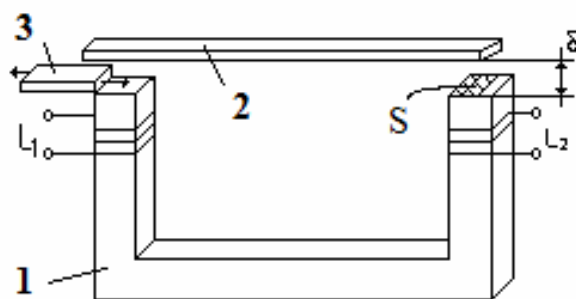


Рис. 4.11. Индуктивный преобразователь
1 – ярмо, 2 – якорь, 3 – диамагнитная пластина

Индуктивность i -обмотки, расположенной на магнитопроводе, может быть определена как

$$L_i = w_i^2 / |Z_M|, \quad (4.17)$$

где w_i – количество витков в i -катушке; Z_M – магнитное сопротивление индуктивного преобразователя.

Взаимоиндуктивность двух обмоток, расположенных на том же магнитопроводе, может быть записана как

$$M_{12} = w_1 w_2 / |Z_M|,$$

где M_{12} – взаимоиндуктивность. Магнитное сопротивление Z_M , его модуль $|Z_M|$, активная (R_M) и реактивная (X_M) составляющая магнитного сопротивления определяются выражениями (4.18-4.21):

$$Z_M = R_M + jX_M, \quad (4.18)$$

$$|Z_M| = (R_M^2 + X_M^2)^{1/2}, \quad (4.19)$$

$$R_M = \delta / (S \mu_0), \quad (4.20)$$

$$X_M = P / (\omega \cdot \Phi^2), \quad (4.21)$$

где δ – величина зазора между якорем и ярмом, S – площадь перекрытия якоря и ярма, μ_0 – магнитная постоянная, P – мощность потерь энергии в магнитопроводе, Φ – магнитный поток в магнитопроводе, ω – круговая частота переменного магнитного поля в магнитопроводе.

Приведенные соотношения показывают, что индуктивность и взаимную индуктивность можно изменить:

- воздействуя на зазор δ ,
- варьируя площадь S перекрытия якоря и ярма в воздушном зазоре,
- увеличивая или уменьшая потери в магнитопроводе.

Указанных изменений можно достичь (рис. 4.11), например, перемещением якоря вверх-вниз ($\delta \uparrow \rightarrow L_i \downarrow$), вправо-влево ($S \downarrow \rightarrow L_i \downarrow$), введением немагнитной металлической пластины в воздушный зазор ($S \downarrow \rightarrow L_i \downarrow$), воздействием силы на замкнутый магнитопровод.

Если пренебречь реактивной составляющей магнитного сопротивления ($X_M = 0$), то индуктивность каждой из катушек изображенного на рис. 4.11 индуктивного преобразователя может быть записана как $L_i = w_i^2 \mu_0 / \delta$. Графически зависимости индуктивности от площади

перекрытия ($L = f(S)$), и от величина зазора ($L = f(\delta)$) представлены на рис. 4.12. Видно, что зависимость $L = f(S)$ имеет линейный характер и обычно используется для измерения больших перемещений (от единиц до десятков см). Зависимость $L = f(\delta)$ имеет гиперболический вид и применяется для контроля за малыми перемещениями и в микрометрах.

Якорь в индуктивном преобразователе испытывает усилие притяжения со стороны электромагнита. Этот недостаток в значительной мере устраняется в индуктивных ИП дифференциального типа, у которых с перемещением якоря увеличивается индуктивность у одной катушки и уменьшается у другой. Силы притяжения, действующие на якорь со стороны двух электромагнитов, приблизительно равны друг другу и взаимно уравновешиваются.

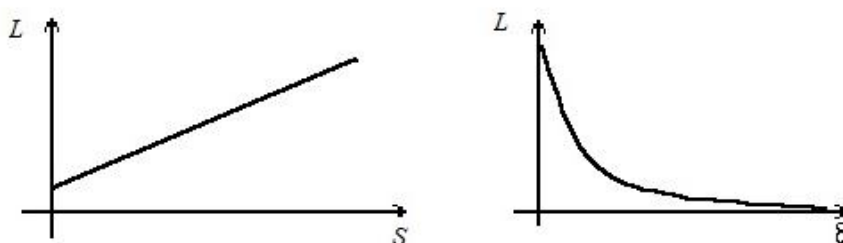


Рис. 4.12. Графики зависимостей $L = f(S)$, $L = f(\delta)$.

Дифференциальный ИП имеет более высокую чувствительность, чем обычный ИП, меньшую погрешность функции преобразования и меньшую погрешность от влияющих величин.

Преобразователи, принцип действия которых основан на использовании зависимости $L = f(B)$ ($B = \Phi/S$ – магнитная индукция), называют магнитомодуляционными.

При деформации ферромагнетиков изменяется их магнитная проницаемость. Этот эффект, называемый магнитоупругим, используется в преобразователях для изменения сил и давлений (рис. 4.13).

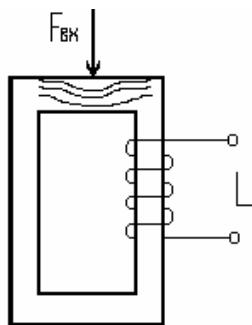


Рис. 4.13. Магнитоупругий преобразователь

Принцип действия магнитоупругих преобразователей состоит в следующем. При увеличении силы $F_{вх}$, действующей на замкнутый магнитопровод, из-за искривления силовых линий в нем уменьшается магнитный поток Φ и возрастает мощность потерь P . Вследствие указанного и согласно (4.21) увеличивается реактивная составляющая магнитного сопротивления X_M , а, значит, уменьшается индуктивность L .

Измерительные цепи индуктивных преобразователей. Наиболее распространенной измерительной цепью является неравновесный измерительный мост (рис. 4.14), в два смежных плеча которого включены две половины дифференциального преобразователя. С измеряемой величиной линейно связана проводимость преобразователя, поэтому оптимальным является питание моста от источника напряжения, а включение преобразователей параллельно источнику. Уравновешивание моста в начальном положении, т. е. при отсутствии входной величины, производится по двум составляющим – измене-

нию сопротивления нерабочего плеча Z_3 или Z_4 и изменению сопротивления r_0 , включаемого в плечо, имеющее меньшее активное сопротивление.

На рис. 4.14 наряду с измерительной схемой изображен упрощенный вид толщиномера-профилемера, используя который можно измерять толщины деталей, изменение их профиля с точностью до нескольких микрометров. Данная схема не содержит трущихся электрических контактов, что является ее достоинством в сравнении с реостатными преобразователями.

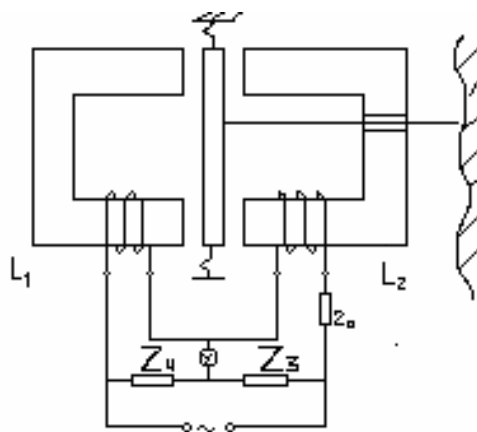


Рис. 4.14. Толщиномер-профилемер на основе дифференциально включенных электромагнитных преобразователей и его измерительная цепь

Для измерения больших перемещений (до десятков сантиметров) в преобразователях используют зависимость индуктивности от площади перекрытия либо выполняют дифференциальный преобразователь в виде цилиндра, внутри которого движется сердечник из магнитомягкого материала, жестко соединенный с перемещающимся объектом (рис. 4.15).

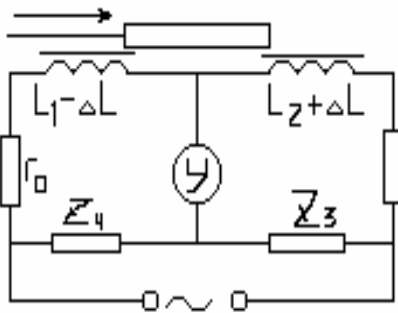


Рис. 4.15. Датчик для измерения больших перемещений

Если в индуктивных ИП дифференциального типа, изображенных на рис. 4.14 и 4.15, при $\Delta\delta = 0$ цепь была уравновешена, то при $\Delta\delta \neq 0$ через указатель потечет ток, равный $I_Y = U \cdot \Delta Y$, где ΔY - приращение электрической проводимости, обусловленное изменением индуктивности катушек L_1 и L_2 .

Промышленностью выпускаются индуктивные ИП для измерения перемещений от нескольких микрометров до десятков сантиметров. Они находят применение в микрометрах, толщиномерах, уровнемерах, а также в приборах для измерения усилий, давлений, крутящих моментах и других величин, которые могут быть преобразованы в перемещение.

4.5.2. Индукционный преобразователь

Индукционные преобразователи основаны на использовании явления электромагнитной индукции. Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС E , индуцированная в катушке из w витков, равна

$$E = - d\Psi/dt = - d(w \cdot \Phi)/dt = - w \cdot d\Phi/dt, \quad (4.22)$$

где Ψ – потокосцепление с контуром, Φ – магнитный поток. Таким образом, выходной величиной индукционного преобразователя является ЭДС, а входной – скорость изменения потокосцепления $d\Psi/dt$.

В общем случае индукционный преобразователь представляет собой катушку с сердечником, которая характеризуется некоторым обобщенным параметром Y , связанным, в том числе, с площадью поперечного сечения катушки. ЭДС в катушке может индуцироваться как в результате изменения во времени внешнего магнитного поля, так и изменения во времени параметра Y преобразователя. Если преобразователь находится в однородном магнитном поле с индукцией B , то в его обмотке, имеющей w витков, наводится ЭДС

$$E = -d\Psi/dt = -w d\Phi/dt = -w (Y \partial B/\partial t + B \partial Y/\partial t), \quad (4.23)$$

где Y – обобщенный параметр преобразователя, равный:

$$Y = S\mu'/(1 + N(\mu' - 1)) \cos\alpha. \quad (4.24)$$

Параметр Y является функцией четырех частных параметров α , S , μ' , N . α – угол между магнитной осью преобразователя, совпадающей с нормалью к плоскости обмотки, и вектором магнитной индукции B ; S – площадь поперечного сечения катушки; μ' – магнитная проницаемость среды; N – коэффициент размагничивания сердечника, определяемый формой и соотношением размеров сердечника.

Если принять $N = 1$, то $Y = S \cdot \cos\alpha$. Тогда параметр Y имеет простой физический смысл и представляет собой площадь проекции катушки на плоскость, перпендикулярную силовым линиям однородного магнитного поля. В случае $B = \text{const}$ ($\partial B/\partial t = 0$) и вращения рамки с

постоянной угловой скоростью $\alpha/t = \omega = 2\pi f$, где f – частота вращения, выражение (4.24) упрощается

$$\begin{aligned} E &= -w \cdot B \cdot \partial Y / \partial t = w \cdot B \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha / dt = \\ &= w \cdot B \cdot S \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) / dt = 2\pi f \cdot w \cdot B \cdot S \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Как видно из (4.25), генерируемая во вращающейся рамке ЭДС прямо пропорциональна модулю магнитной индукции B и частоте вращения f . Поэтому индукционные преобразователи могут применяться для измерения параметров магнитных полей, частоты вращения, параметров вибрации и сейсмических колебаний.

Для измерения скорости угловых перемещений и частоты вращения используются индукционные преобразователи, которые представляют собой катушку, помещенную в постоянное однородное магнитное поле и присоединенную механическим образом к вращающейся детали (рис. 4.16). Такого типа преобразователи лежат в основе работы электромеханических тахометров, измерителей частоты вращения.

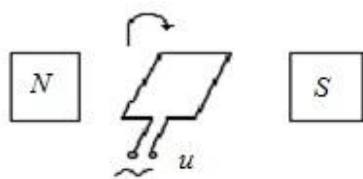


Рис. 4.16. Индукционный преобразователь для измерения частоты вращения

Принцип действия преобразователя виброскорости поясняется на рис. 4.17. В катушке, колеблющейся в зазоре с неоднородным, плавно уменьшающимся к периферии, радиальным магнитным полем, индуцируется ЭДС:

$$E = \Omega X_m B_N w l_{cp} \sin(\Omega t), \quad (4.26)$$

где $\Omega X_m \sin(\Omega t) = dx/dt$ – скорость катушки, совершающей колебания $x = X_m \sin(\Omega t)$; B_N – индукция в зазоре; w – число витков, l_{cp} – средняя длина витка.

Обычно индукционные преобразователи применяются для измерения параметров вибрации не более 1 – 5 мм.

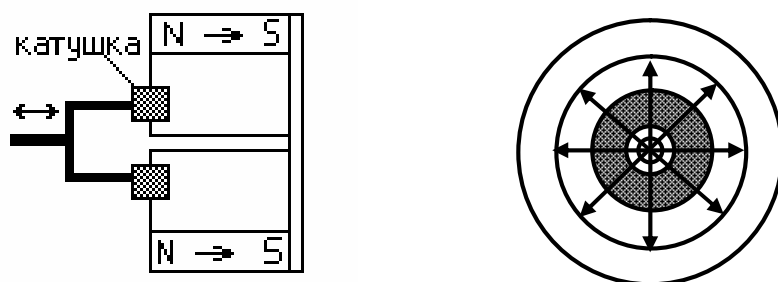


Рис. 4.17. Акселерометр, или преобразователь для измерения вибраций или виброскорости

4.6. Электростатические преобразователи

4.6.1. Емкостные преобразователи

Емкостной преобразователь представляет собой конденсатор, электрические параметры которого изменяются под действием входной величины.

Конденсатор состоит из двух электродов, к которым подсоединены выводные концы. Пространство между электродами заполнено диэлектриком. При изменении взаимного положения электродов или при изменении диэлектрической проницаемости среды, заполняющей межэлектродное пространство, изменяется емкость конденсатора.

В качестве емкостного преобразователя широко используется плоский конденсатор. Его емкость определяется выражением:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S / \delta, \quad (4.27)$$

где ϵ_r – относительная проницаемость диэлектрика; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь перекрытия пластин; δ – расстояние

между электродами. Изменение любого из этих параметров изменяет емкость конденсатора.

У преобразователя с прямоугольными электродами (рис. 4.18) площадь перекрытия определяется как $S = bx$ имеется некоторый диапазон перемещения пластин x , в котором емкость линейно зависит от x (рис. 4.19, а). Линейная зависимость может искажаться из-за краевого эффекта. В области линейности зависимости чувствительность такого преобразователя постоянна и увеличивается с уменьшением расстояния между электродами δ . Она определяется формулой:

$$K_C = dC/dx = \varepsilon_r \varepsilon_0 b / \delta. \quad (4.28)$$

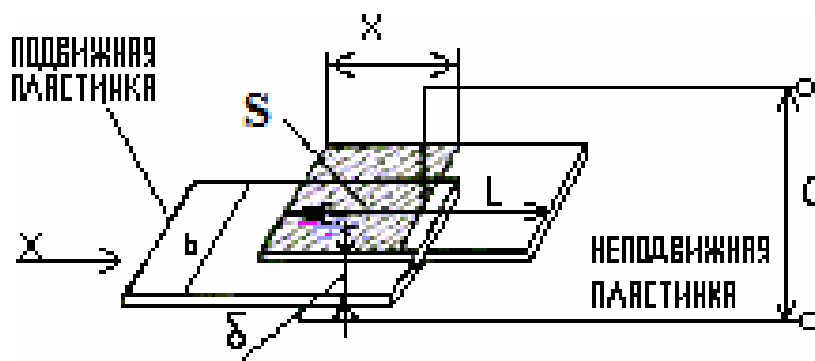


Рис. 4.18. Емкостный преобразователь

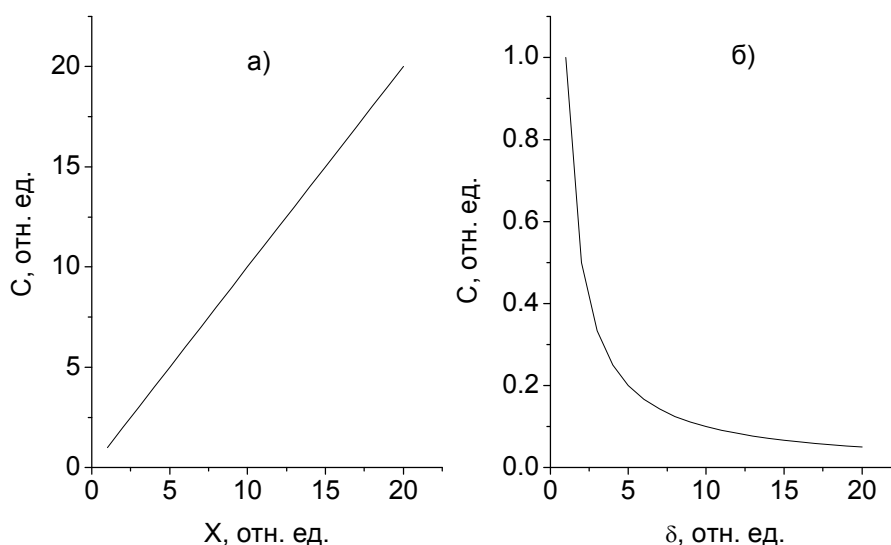


Рис. 4.19. Графики зависимостей:
(а) – $C=f(x)$, (б) – $C=f(\delta)$

При изменении расстояние δ между электродами, то функция преобразования $C = f(\delta)$ представляет собой гиперболическую функцию (рис. 4.19, б). Чувствительность преобразователя в значительной степени зависит от расстояния между пластинами, в большей мере при малых изменениях δ :

$$K_C = dC/d\delta = \varepsilon_r \varepsilon_0 S / \delta^2 \quad (4.29)$$

Для увеличения чувствительности K_C целесообразно уменьшить δ . Предельное его значение определяется технологическими условиями и приложенным напряжением. Надо учитывать, что при малых δ возможен электрический пробой между электродами³.

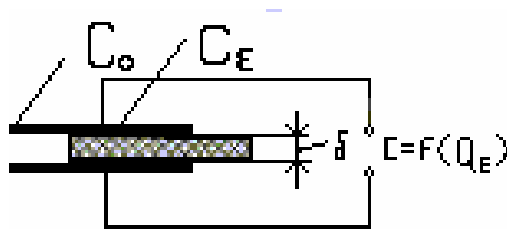


Рис. 4.20. Емкостной преобразователь с перемещающейся диэлектрической пластиной

Если перемещать диэлектрическую пластину в зазоре плоского конденсатора (рис. 4.20), то можно получить преобразователь с переменной диэлектрической проницаемостью. Емкость такого преобразователя определяется как емкость двух параллельно включенных конденсаторов. Один из них – C_ε образован частью электродов и диэлектрической пластиной, другой C_0 – оставшейся частью электродов с межэлектродным пространством, заполненным, например, воздухом с относительной диэлектрической проницаемостью ε_0 . Если пластинка с относительной диэлектрической проницаемостью ε_δ имеет тол-

³ Пробой в сухом воздухе при атмосферном давлении происходит при напряженности $E = 30$ кВ/см. Однако расчетное значение напряженности обычно не превосходит 700 В/см.

щину δ , равную расстоянию между электродами, то функция преобразования преобразователя описывается выражением:

$$C = C_\varepsilon + C_0 = \varepsilon_d \varepsilon_0 S_d + \varepsilon_b \varepsilon [S - S_d] / \delta = \varepsilon_d \varepsilon_0 x b / \delta + \varepsilon_b \varepsilon_0 (L - x) b / \delta = \\ = \varepsilon_b \varepsilon_0 b L / \delta + \varepsilon_0 (\varepsilon_d - \varepsilon_b) b x / \delta, \quad (4.30)$$

где S – площадь прямоугольных электродов с длиной L и шириной b (обозначения как на рис. 4.18); S_d – часть площади диэлектрической пластины, находящейся между электродами и смещенной на x . Из (4.30) следует, что зависимость емкости изображенного на рис. 4.18 преобразователя является линейной функцией смещения x диэлектрика, а графически она выглядит подобно представленной на рис. 4.19 (а).

Применение. Емкостные преобразователи широко используются для определения уровня непроводящей (рис. 4.21) и проводящей жидкости, для измерения толщины диэлектрических пленок.

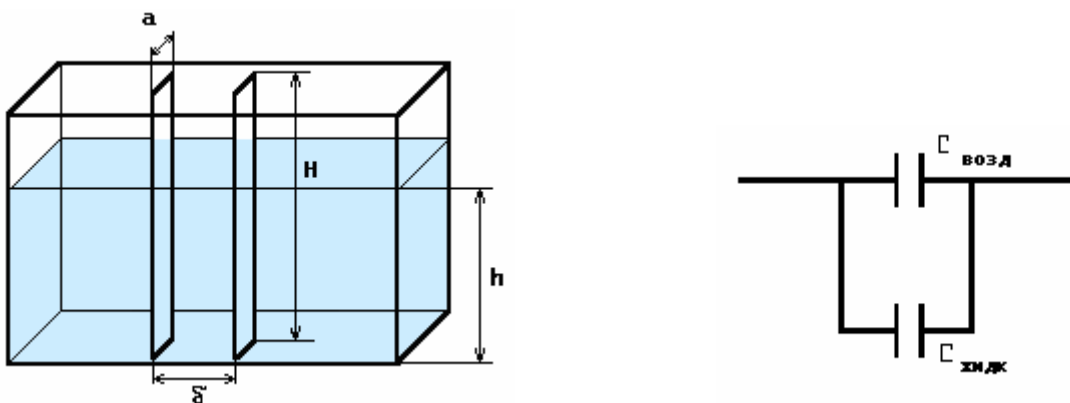


Рис. 4.21. Емкостный преобразователь для определения уровня непроводящей жидкости (a – ширина пластины, H – высота пластины, δ – расстояние между пластинами, h – высота уровня жидкости)

Эквивалентную схему емкостного преобразователя для измерения уровня непроводящей жидкости можно представить в виде двух

параллельно соединенных конденсаторов, один из которых в качестве диэлектрика имеет воздух, другой – непроводящую жидкость. Тогда электрическая емкость преобразователя может быть определена как

$$C = C_{\text{возд}} + C_{\text{ж}} = \varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_0(H - h)a/\delta + \varepsilon_{\text{ж}}\varepsilon_0ah/\delta = k_1 + k_2h, \quad (4.31)$$

где k_1, k_2 – постоянные величины: $k_1 = \varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_0aH/\delta$, $k_2 = \varepsilon_0(\varepsilon_{\text{ж}} - \varepsilon_{\text{в}})a/\delta$. Здесь k_2 – чувствительность преобразователя.

Таким образом, емкость C связана линейным образом с уровнем жидкости h . С ростом h при $\varepsilon_{\text{ж}} > \varepsilon_{\text{в}}$ она увеличивается, а при $\varepsilon_{\text{ж}} < \varepsilon_{\text{в}}$ уменьшается. В зависимости от соотношения $\varepsilon_{\text{ж}}$ и $\varepsilon_{\text{в}}$ он может принимать положительные и отрицательные значения.

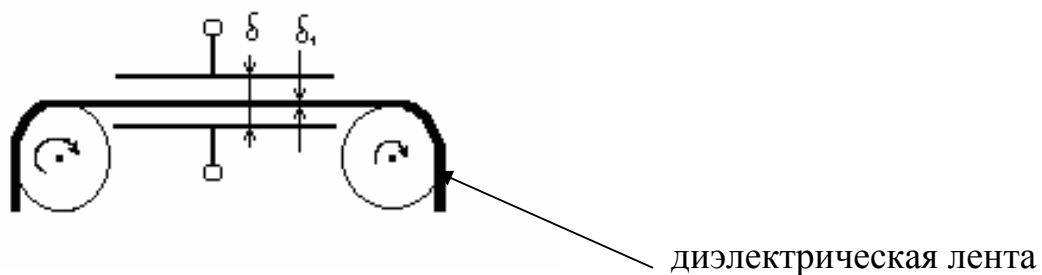


Рис. 4.22. Преобразователь для измерения толщины диэлектрических пленок: δ – расстояние между обкладками конденсатора; δ_l – толщина диэлектрической ленты

Емкостный преобразователь для измерения толщины диэлектрических пленок изображен на рис. 4.22. Его емкость может быть представлена как суммарная емкость двух последовательно подключенных конденсаторов с одинаковой площадью обкладок и различающимися материалами диэлектрика (воздух и лента) и межобкладочными расстояниями $((\delta - \delta_l)$ и δ_l):

$$\begin{aligned} C &= CC_l / (C + C_l) = \varepsilon_{\text{и}}\varepsilon_{\text{л}}\varepsilon_0 S / [(\delta - \delta_l)\varepsilon_{\text{л}} + \delta_l\varepsilon_{\text{в}}] = \\ &= [S\varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_{\text{л}}\varepsilon_0 / (\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_{\text{л}})] / [\delta / (\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_{\text{л}}) + \delta_l] = k_1 / (k_2 + \delta_l), \end{aligned} \quad (4.32)$$

где k_1, k_2 – постоянные величины: $k_1 = S\varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_{\text{л}}\varepsilon_0/(\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_{\text{л}})$, $k_2 = \delta\varepsilon_{\text{л}}/(\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_{\text{л}})$.

$$C = k_1/(k_2 + \delta_{\text{л}}) \quad (4.33)$$

Продифференцируем выражение (4.33):

$$dC = -k_1 d\delta_{\text{л}}/(k_2 + \delta_{\text{л}})^2. \quad (4.34)$$

Так как величины dC и $d\delta_{\text{л}}$ в равенстве (4.34) очень малы, то их можно заменить приращениями:

$$\Delta C = -k_1 \cdot \Delta\delta_{\text{л}}/(k_2 + \delta_{\text{л}})^2. \quad (4.35)$$

Таким образом, из формулы (4.35) видно, что изменение толщины ленты приводит к линейному изменению емкости.

Измерительные цепи емкостных преобразователей. Емкостный преобразователь включается в измерительную цепь; при этом изменение его емкости преобразуется в изменение либо напряжения или тока, либо в частоту синусоидального или импульсного тока. Существует довольно много различных измерительных цепей включения емкостных преобразователей. Наиболее часто применяют мостовые и резонансные цепи. Первые используют совместно с дифференциальными преобразователями, а вторые – с недифференциальными. Проанализируем некоторые из них.

Дифференциальный емкостной преобразователь для измерения больших перемещений и его подключение в мостовую измерительную цепь представлены на рис. 4.23 и 4.24.

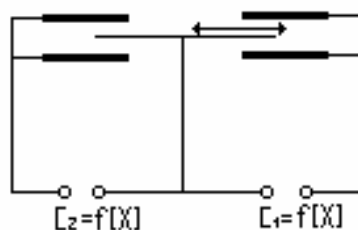


Рис. 4.23. Преобразователь для измерения больших перемещений

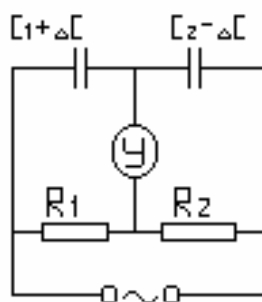


Рис. 4.24. Мостовая измерительная цепь для измерения больших перемещений

Схема дифференциального преобразователя углового перемещения d с переменной площадью электродов приведена на рис. 4.25. В таких преобразователях средний подвижный электрод обычно соединяется с экраном. Пластина 1, жестко скрепленная с валом, перемещается относительно пластины 2 так, что величина зазора между ними сохраняется неизменной. Достоинством емкостных преобразователей с переменной площадью пластин является возможность в результате выбора соответствующей формы подвижной 1 и неподвижной 2 пластин получить заданную функциональную зависимость между изменением емкости и входным угловым или линейным перемещением. Преобразователи с переменной площадью пластин применяются для измерения перемещений больше 1 мм.

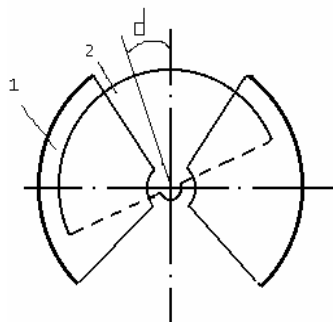


Рис. 4.25. Схема дифференциального преобразователя углового перемещения:
(1 и 2 – неподвижная и поворачивающаяся пластины соответственно)

Как выше отмечено, для включения недифференциального преобразователя может использоваться резонансная цепь (см. рис. 4.26). Генератор через разделительный трансформатор T питает резонансный LC -контур. Емкость контура состоит из емкости преобразователя $C_{пр}$ и подстроечного конденсатора емкостью C^* ; частота и значение напряжения генератора постоянны. При изменении емкости напряжение на контуре изменяется по резонансной кривой, как показано на рис. 4.27. При изменении емкости преобразователя на ΔC напряжение на контуре изменяется на ΔU . Подстроечный конденсатор служит для настройки контура так, чтобы чувствительность S измерительной цепи была максимальной:

$$S = \Delta U / \Delta C \quad (4.36)$$

Важно подчеркнуть, что чувствительность резонансной цепи довольно высока и увеличивается с ростом добротности контура.

Емкостные преобразователи имеют ряд специфических достоинств и недостатков, определяющих область их применения. Конструкция емкостного датчика проста, он имеет малую массу и размеры. Его подвижные электроды могут быть достаточно жесткими, с высокой собственной частотой, что дает возможность измерять быстропе-

ременные величины. Емкостные преобразователи можно выполнять с заданной (линейной или нелинейной) функцией преобразования. Для получения требуемой функции преобразования часто достаточно изменить форму электродов.

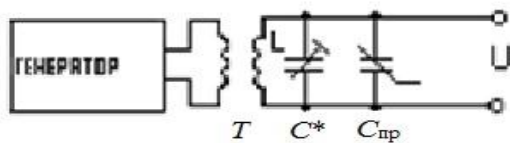


Рис. 4.26. Резонансная цепь

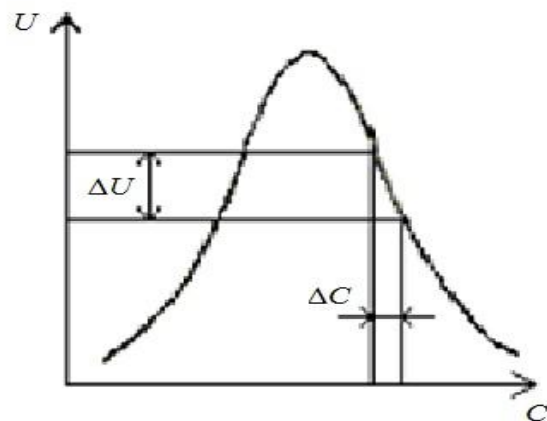


Рис. 4.27. Резонансная кривая

Отличительной особенностью емкостных преобразователей является малая сила притяжения электродов, а основным недостатком является их малая емкость и высокое сопротивление. Для уменьшения последнего преобразователи используют напряжение высокой частоты. Недостатком является и то, что результат измерения зависит от изменения параметров кабеля, соединяющего преобразователь с измерительной цепью.

4.6.2. Пьезоэлектрические преобразователи

Входной величиной пьезоэлектрических преобразователей является сила, давление, а выходной величиной – заряд.

Принцип действия чувствительных пьезоэлектрических элементов основан на использовании свойств некоторых кристаллов, способных образовывать на своих гранях электростатические заряды под

действием упругих деформаций (прямой пьезоэффект) и деформироваться в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Пьезоэффект возникает в кристаллах кварца, турмалина, сегнетовой соли (калийно-натриевая соль винной кислоты), титаната бария, цирконата свинца и некоторых других веществ. Чувствительные пьезоэлектрические элементы позволяют контролировать быстропротекающие процессы, т. к. заряды образуются практически безынерционно. В качестве материала для их изготовления чаще всего применяют кварц, имеющий низкую температурную чувствительность и обладающий большим модулем упругости ($81 \cdot 10^{10}$ Н/м²). Это позволяет осуществлять измерения при ничтожно малых перемещениях. Кристаллы кварца представляют собой шестиугольные призмы (рис. 4.28).

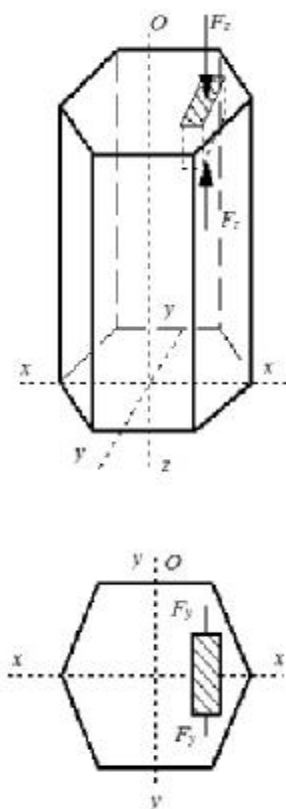


Рис. 4.28. Кварцевый кристалл:
O или *Z* – оптическая ось; *X* – электрическая ось; *Y* – механическая ось

Продольная ось кристалла Z называется оптической; ось, проходящая через ребра призмы – электрической осью X . Нейтральной или механической осью Y называется ось, проходящая через середины противоположащих граней. Вырезанный из кварцевого кристалла прямоугольный параллелепипед, грани которого перпендикулярны осям Y и X , обладает пьезоэлектрическими свойствами.

Пьезоэффект обладает знакочувствительностью, что проявляется в изменении знаков заряда на определенных гранях при замене сжатия растяжением и наоборот. На рис. 4.29 показано расположенное перпендикулярно оптической оси Z сечение элементарной ячейки кристаллической структуры кварца.

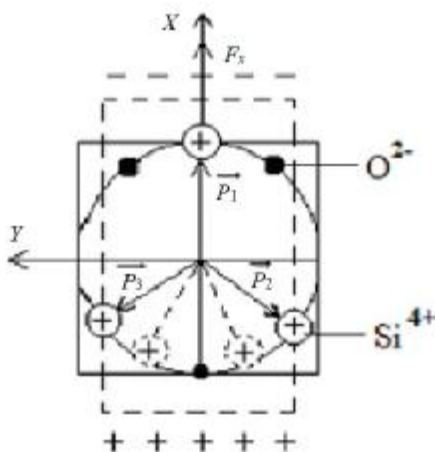


Рис. 4.29. Элементарная ячейка кварца

Ячейка в целом электрически нейтральна, однако в ней можно выделить три направления, проходящие через центр и соединяющие два разнополярных иона. Эти полярные направления, как выше указано, называются *электрическими осями*, или *осями X* . По ним направлены векторы поляризации \vec{P}_1 , \vec{P}_2 и \vec{P}_3 . Если к кристаллу кварца вдоль оси X приложена сила F_x , равномерно распределенная по грани, перпендикулярной оси X , то в результате деформации элементарной

ячейки ее электрическая нейтральность нарушается. В деформированном состоянии ячейки сумма проекций векторов P_{2x} и P_{3x} на ось X становится меньше (при сжатии) или больше (при растяжении) проекции вектора P_{1x} .

В результате появляются поляризационные заряды, знаки которых для растяжения показаны на рис. 4.29. Нетрудно заметить, что рассмотренная деформация ячейки не влияет на электрическое состояние вдоль механической оси Y . Здесь сумма проекций равна либо нулю, либо $P_{2y} = -P_{3y}$, а $P_{1y} = 0$. Образование поляризационных зарядов на гранях, перпендикулярных оси X , при действии силы вдоль оси X называется *продольным пьезоэффектом*.

При механических напряжениях вдоль одной из механических осей Y поляризационные заряды также образуются на гранях, перпендикулярных осям X . Так при сжатии получается такое же распределение зарядов, как при растяжении вдоль оси X . Рассмотренный пьезоэффект называется *поперечным*.

Преимуществами пьезопреобразователей являются широкий диапазон рабочих температур, минимальные упругие деформации, очень широкий диапазон измерений, высокая чувствительность. К их недостаткам следует отнести необходимость обеспечения очень высокого сопротивления изоляции измерительных цепей, а также непригодность преобразователей для статических измерений.

Пьезоэффект находит применение в преобразователях:

1. в которых используется прямой пьезоэффект. Они применяются в приборах для измерения силы, давления, ускорения;

2. в которых используется обратный пьезоэффект. Они применяются в качестве излучателей ультразвуковых и звуковых колебаний, обратных преобразователей приборов уравнивания, пьезоэлектрических реле, исполнительных элементов автоматических систем;

3. в которых используется одновременно прямой и обратный пьезоэффекты – пьезорезонаторы.

При воздействии на пластину усилия F_x вдоль электрической оси X на гранях, перпендикулярных X , появятся заряды

$$Q_x = k \cdot F_x,$$

где k – пьезоэлектрический коэффициент или пьезомодуль.

Нагрузки, действующие в направлении механической оси Y кристалла, вызывают возникновение заряда Q_y :

$$Q_y = k \frac{l_y}{l_x} F_y, \quad (4.37)$$

где l_y и l_x – размеры кристалла в направлении осей y и x . При поперечном эффекте величина заряда Q_y зависит от размеров кристалла. Условия прочности не позволяют получить большие заряды за счет увеличения l_y и снижения l_x , поэтому на практике используют лишь продольный пьезоэффект. При температурах выше 500 °С пьезоэффект исчезает. Температура 537 °С, при которой структура кварца переходит в структуру, не обладающую пьезоэлектрическим эффектом, называется *точкой Кюри*. Для измерения электрических зарядов, возникающих на гранях кварцевой пластины, последние покрывают металлическим слоем, образующим конденсатор (рис. 4.30).

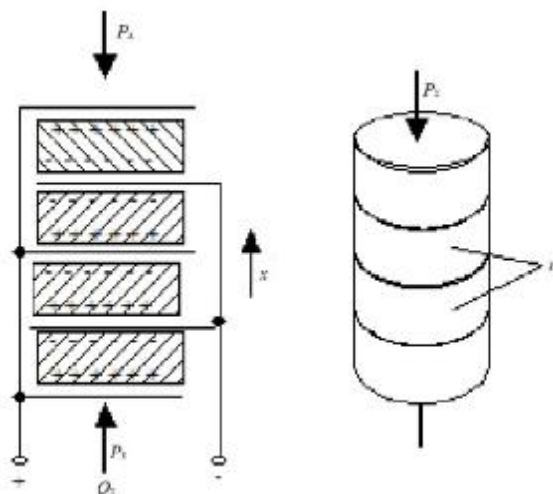


Рис. 4.30. Чувствительный элемент с несколькими кварцевыми пластинами n

Так как $Q = CU$, то напряжение на кристалле определяется формулой:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{kF}{C_0 + C_s}, \quad (4.38)$$

где C_0 – емкость конденсатора с диэлектриком из кварца; C_s – суммарная емкость проводов и подключенных устройств.

Величина C_s учитывается при калибровке преобразователя. Обычно емкость C_s превышает емкость пьезокристалла C_0 , что резко снижает чувствительность преобразователя. Поэтому C_0 искусственно увеличивают при помощи параллельного соединения нескольких пластин (рис. 4.30). Выбор их числа позволяет изменять диапазон измерения.

Поскольку каждый измеритель напряжения (вольтметр) обладает конечным значением входного сопротивления R_t , то образующийся на гранях кристалла заряд и соответственно напряжение спадают по экспоненциальному закону:

$$U_t = U \cdot e^{-\frac{t}{R_t(C_0 + C_s)}}, \quad (4.39)$$

где $R_t (C_0 + C_s)$ – постоянная времени.

По истечении времени $t = R_t (C_0 + C_s)$ напряжение U_t уменьшается в e раз, т.е. примерно до 37 % от начального значения U . Это ограничивает возможности использования пьезокристаллов – для контроля только кратковременных и быстро изменяющихся процессов.

5. ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. Физические основы тепловых измерений

Тепловыми называются измерения, принцип осуществления которых основан на использовании тепловых процессов (нагрев, охлаждение, теплообмен), а входной величиной является температура. К тепловым преобразователям относятся термопары и терморезисторы (металлические и полупроводниковые). Следует отметить, что тепловые преобразователи широко используются как преобразователи не только температуры, но и таких величин, как тепловой поток, скорость потока газа или жидкости, расход, химический состав и давление газов, влажность, уровень и т. п.

Температура как параметр теплового процесса не поддается непосредственному измерению. В то же время она является функцией состояния вещества и непосредственно связана с внутренней энергией тел, а через нее и с другими свойствами. Следовательно, при изменении температуры меняются многие другие физические свойства тел, которые и используются при построении преобразователей температуры.

Основным уравнением теплового преобразования является уравнение теплового баланса, физический смысл которого заключается в том, что все тепло, поступающее к преобразователю, идет на повышение его теплосодержания $Q_{тс}$, и, следовательно, если теплосодержание преобразователя остается неизменным (не меняется температура и агрегатное состояние), то количество поступающего в единицу времени тепла равно количеству отдаваемого тепла. Тепло, по-

ступающее к преобразователю, является суммой количества тепла $Q_{эл}$, создаваемого в результате выделения в нем электрической мощности, и количества тепла $Q_{то}$, поступающего в преобразователь или отдаваемого им в результате теплообмена с окружающей средой.

Таким образом, уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_{то} + Q_{эл} = Q_{тс}, \quad (5.1)$$

и основы расчета тепловых преобразователей заключаются в расчете процессов теплопередачи и теплосодержания.

Теплосодержание при неизменном агрегатном состоянии вещества зависит от массы m и удельной теплоемкости c материала преобразователя и связано с температурой θ преобразователя формулой:

$$Q_{тс} = mc\theta. \quad (5.2)$$

Теплообмен состоит в переходе некоторого количества тепловой энергии из одной части пространства в другую. Теплообмен может осуществляться тремя совершенно различными способами.

При теплообмене посредством теплопроводности перенос тепловой энергии происходит только путем взаимодействия частиц, находящихся в непосредственном соприкосновении друг с другом и имеющих различную температуру. Теплообмен путем теплопроводности в чистом виде имеет место только в твердых телах.

Теплообмен посредством конвекции совершается путем перемещения материальных частиц и может иметь место только в жидкостях и газах. Если причиной потоков жидкости или газа является неодинаковая плотность среды, вызванная разностью температур, то говорят о естественной конвекции. Движение потоков под действием внешних причин вызывает вынужденную конвекцию. Конвективный

теплообмен всегда включает в себя обмен посредством теплопроводности, и суммарный теплообмен между стенкой и средой называется *теплоотдачей*.

Ещё одним способом теплообмена является теплообмен посредством излучения. Тепловое излучение представляет собой поток электромагнитных волн, излучаемых телом за счет его тепловой энергии и полностью или частично поглощаемых другими телами.

На практике обычно имеет место комбинация различных способов теплообмена, отдельные виды которых можно показать на примере приводимых ниже формул.

Теплопроводность. Распространение тепла путем теплопроводности определяется законом Фурье

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } (\theta), \quad (5.3)$$

где q – тепловой поток, представляющий собой количество тепла, переданного в единицу времени через единицу поверхности, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Полный тепловой поток, создаваемый разностью температур, можно записать следующим образом:

$$q_{\text{тп}} = G_{\theta} \cdot \Delta\theta, \quad (5.4)$$

где G_{θ} – тепловая проводимость среды.

Тепловая проводимость среды зависит от коэффициента теплопроводности и геометрических соотношений теплопроводящего изделия. Для ее расчета можно использовать формулы, аналогичные электрической проводимости, заменив удельную проводимость коэффициентом теплопроводности.

Теплоотдача. Полный тепловой поток в результате теплоотдачи определяется по формуле Ньютона

$$q_{\text{то}} = \xi S \Delta\theta, \quad (5.5)$$

где ξ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); S – поверхность тела; $\Delta\theta$ – разность температур окружающей среды и тела.

Тепловое излучение свойственно всем телам, и каждое из них непрерывно излучает и поглощает энергию. Разность между излучаемой и поглощаемой телом лучистой энергией не равно нулю, если температура тел, участвующих во взаимном обмене лучистой энергией, различна. По закону Стефана-Больцмана полное количество энергии, излучаемой в единицу времени единицей поверхности, которая имеет температуру θ , равно

$$E_0 = \sigma_0 \theta^4, \quad (5.6)$$

где $\sigma_0 = 5.7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – константа излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана применим и к реальным серым телам, но их константа σ рассчитывается с учетом степени черноты тела ε , т. е. $\sigma = \varepsilon \sigma_0$. Значение ε изменяется от нуля до единицы и приводится в справочниках.

Количество поглощаемой телом лучистой энергии зависит от степени черноты тела и определяется формулой $E = \varepsilon E_{\text{эфф}}$, где $E_{\text{эфф}}$ – извне падающее эффективное излучение окружающих тел. При выводе формул лучистого теплообмена между телами необходимо учитывать, кроме лучеиспускательной, поглощательной и отражательной способности тел, их размеры и направление излучений. Относительно простые формулы могут быть получены только для теплообмена ме-

жду плоскими параллельными поверхностями и между двумя поверхностями в замкнутом пространстве, когда одна из поверхностей обтекает другую обязательно выпуклую поверхность (см. рис 5.1).

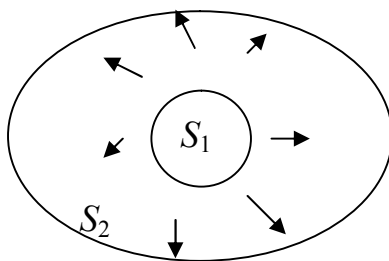


Рис. 5.1. Излучательный теплообмен

Во данном случае количество тепла, получаемое или отдаваемое в секунду меньшим телом с поверхности S_1 равно

$$q_{12} = \sigma_{\text{п}}(\theta_1^4 - \theta_2^4)S_1, \quad (5.7)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ – приведенная константа Больцмана с учетом степени черноты обоих тел.

Для уменьшения лучеиспускания тела при заданных температурах уменьшают степень его черноты и применяют экран.

Уравнение теплового баланса преобразователей при неизменном агрегатном состоянии среды и постоянной температуре тел определяется как

$$q_{\text{эл}} + q'_{\text{тп}} + q_{\text{тп}} + q_{\text{конв}} + q_{\text{ли}} = 0, \quad (5.8)$$

где $q_{\text{эл}} = i^2 R$ – теплота Джоуля; $q'_{\text{тп}}$ – теплопроводность через преобразователь; $q_{\text{тп}}$ – теплопроводность через окружающую среду, $q_{\text{конв}}$ – конвекция; $q_{\text{ли}}$ – лучеиспускание.

Выражая с помощью формул все виды тепловых потерь, уравнение теплового баланса можно представить как

$$i^2 R + G'(\theta - \theta_a) + G_{\theta}(\theta - \theta_{cp}) + \xi S(\theta - \theta_{cp}) + \sigma_{\pi}(\theta^4 - \theta_{cn}^4)S = 0, \quad (5.9)$$

где θ_a , θ_{cp} , θ_{cn} – температура внешней среды (атмосферы), среды, окружающей преобразователь, и стенок соответственно.

Как видно из уравнения (5.9), температура θ преобразователя зависит от многих параметров:

- коэффициента теплоотдачи ξ , связанного со скоростью движения окружающей среды;
- тепловой проводимости среды, определяемой ее свойствами;
- геометрических форм окружающих тел и удаленности их от преобразователя.

Выделив соответствующий эффект и сделав пренебрежимо малыми остальные, тепловые преобразователи можно использовать для измерения температуры среды, скорости ее движения, концентрации вещества (вакуум), изменяющего теплопроводность среды, и перемещения.

5.2. Терморезисторы

Принцип действия этих преобразователей основан на зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры. Между терморезистором и исследуемой средой в процессе измерения происходит теплообмен. Так как терморезистор включен в электрическую цепь, с помощью которой производят измерение его сопротивления, то по нему протекает ток, выделяющий в нем теплоту. Теплообмен терморезистора со средой происходит

из-за теплопроводности самого терморезистора, теплопроводности среды и конвекции в ней, а также из-за излучения. Интенсивность теплообмена, а следовательно, и температура терморезистора зависят от его геометрических размеров и формы, от конструкции защитной арматуры, состава, плотности, теплопроводности, вязкости и других физических свойств газовой или жидкой среды, окружающей терморезистор, а также от температуры и скорости перемещения среды. Для преобразований температуры используют материалы, обладающие высокой стабильностью температурного коэффициента сопротивления (ТКС), высокой воспроизводимостью электрического сопротивления для данной температуры, значительным удельным электрическим сопротивлением и высоким ТКС, стабильностью химических и физических свойств при нагревании, инертностью к воздействию исследуемой среды.

Проводниковые терморезисторы. Для измерения температуры наиболее распространены терморезисторы, выполненные из медной или платиновой проволоки. Стандартные платиновые терморезисторы применяют для измерения температуры от 13 К (–260 °С) до 1400 К (1100 °С), медные – в диапазоне от 73 К (–200 °С) до 500 К (200 °С) (ГОСТ 6651-78).

Конструкция платинового терморезистора имеет следующие элементы. В каналах керамической трубки расположены две (или четыре) секции спирали из платиновой проволоки ($d \geq 1$ мкм), соединенные между собой последовательно. К концам спирали приваривают выводы, используемые для включения терморезистора в измерительную цепь. Каналы трубки засыпают порошком безводной оки-

си алюминия, выполняющего роль изолятора и фиксатора спирали. Порошок оксида алюминия, имеющий хорошую теплопроводность и малую теплоемкость, обеспечивает хорошую теплопередачу и малую инерционность терморезистора. Для защиты от механических и химических воздействий внешней среды его помещают в защитную арматуру из нержавеющей стали.

Начальные сопротивления (при 273 К или 0 °С) платиновых терморезисторов равны 1, 5, 10, 46, 50, 100 и 500 Ом, медных – 10, 50, 53 и 100 Ом. Допустимое значение тока, протекающего через терморезистор при включении его в измерительную цепь, должно быть таким, чтобы изменение сопротивления терморезистора за счет электрического нагрева не превышало 0.1% начального сопротивления.

Температурная зависимость сопротивления платины в диапазоне от 0 до 650 °С описывается уравнением Каллендара

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (5.10)$$

где R_{θ} , R_0 – сопротивления преобразователя при θ и 0 °С; A и B – постоянные коэффициенты (для платиновой проволоки, применяемой в промышленных преобразователях температуры, $A = 3,9702 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $B = -5,8893 \cdot 10^{-7}$ 1/К²); θ – температура в градусах Цельсия.

В интервале температур от 0 до -200 °С зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид

$$R_{\theta} = R_0 [1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2 + C (\theta - 100)^3], \quad (5.11)$$

где $C = -4,356 \cdot 10^{-12}$ 1/К³ – постоянный коэффициент.

К недостаткам платиновых преобразователей температуры относится довольно высокая загрязняемость платины при высоких тем-

пературах парами металлов (особенно железа), сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, вследствие чего она становится хрупкой, теряет стабильность характеристик.

Медь благодаря своей низкой стоимости и довольно высокой стойкости к коррозии широко применяется в преобразователях температуры в диапазоне от -50 до $+180$ °С. Температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha_\theta = 1/234,7$ 1/К, зависимость электрического сопротивления от температуры линейная:

$$R_\theta = R_0(1 + \alpha_\theta \theta). \quad (5.12)$$

К недостаткам медных преобразователей температуры относится высокая окисляемость меди при нагревании, вследствие чего они применяются в указанном сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

Кроме платины и меди для чувствительных элементов преобразователей температуры применяют никель, вольфрам и другие чистые металлы (табл. 5.1).

Никель – химически стойкий материал даже при высоких температурах, однако имеет сложную зависимость сопротивления от температуры и невысокую ее воспроизводимость. В диапазоне температур от -50 до $+180$ °С температурная зависимость сопротивления никеля следующая:

$$R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta^2 + C\theta^3), \quad (5.13)$$

где A , B – постоянные коэффициенты, $A = 5,5 \cdot 10^{-3}$ К $^{-1}$, $B = 6,4 \cdot 10^{-6}$ К $^{-2}$; $C = 0,69 \cdot 10^{-8}$ К $^{-3}$.

Тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал и ниобий – имеют ограниченное применение. Влияние рекристаллизации и роста зерен в результате действия температуры делает чувствительный элемент из этих материалов хрупким и поэтому очень чувствительным к механическим вибрациям.

Таблица 5.1

Некоторые физические свойства материалов
терморезистивных преобразователей (при 20 °С)

Материал	ТКС, 10^{-3} , 1/К	Удельное сопротивление, Ом·мм ² /м	Температура плавления, °С	Термо-ЭДС в паре с медью, м·кВ/°С
Платина	3,91	0,105	1773	7,5
Медь	4,28	0,017	1083	0
Никель	6,3...6,6	0,068	1455	22,5
Вольфрам	4,82	0,055	3410	0,5
Молибден	4,57	0,052	2630	—
Рений	3,11	0,211	3170	—
Родий	4,57	0,047	1960	—
Графит	0,02	46,000	3870	—
Платинородий (родия 20 %)	1,21	0,160	1900	—

Термисторы. Для измерения температуры применяют также полупроводниковые терморезисторы (термисторы) различных типов, которые характеризуются большой чувствительностью (ТКС термистора отрицательный и при 20 °С в 10-15 раз превышает ТКС меди и платины) и более высоким сопротивлением (до 1 МОм и более) при весьма малых размерах. Недостаток термисторов – плохая воспроизводимость и нелинейность характеристики преобразования (рис. 5.2):

$$R_T = R_0 \exp[B(1/T - 1/T_0)], \quad (5.14)$$

где R_T и R_0 – сопротивления термистора при температурах T и T_0 в кельвинах; B – экспериментально определяемый коэффициент; T_0 – начальная температура рабочего диапазона.

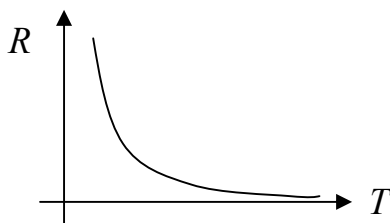


Рис. 5.2. Зависимость сопротивления полупроводникового терморезистивного преобразователя от температуры

Существует много разновидностей полупроводниковых терморезисторов (см. табл. 5.2), отличающихся конструктивными и техническими параметрами. Это стержневые полупроводниковые терморезисторы, покрытые эмалью (ММТ-1, КМТ-1) и герметизированные металлической капсулой (ММТ-4, КМТ-4), каплевидные полупроводниковые терморезисторы, герметизированные стеклом (СТЛ-19, СТЗ-19), и др. Номинальные значения сопротивлений терморезисторов имеют допуск $\pm 20 \%$.

Терморезисторы могут быть изготовлены самой разнообразной формы. На рис. 5.3. показано устройство терморезистора типа ММТ-1 и КМТ-1, который представляет собой полупроводниковый стержень, покрытый эмалевой краской, с контактными колпачками и выводами. Данный тип терморезисторов может быть использован лишь в сухих помещениях.

Термисторы используют в диапазоне температур от единиц до 700 К. Для измерения температур в диапазоне от -80°C до 150°C

применяют термодиоды и термотранзисторы, у которых под действием температуры изменяется сопротивление p - n -перехода и происходит падение напряжения на этом переходе.

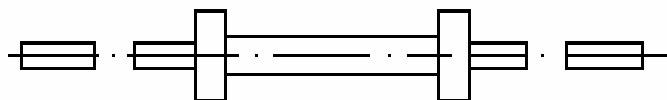


Рис. 5.3. Терморезистор типа ММТ-1 и КМТ-1

Таблица 5.2

Основные технические параметры
некоторых полупроводниковых терморезисторов

Тип	Номинальное сопротивление при 20 °С, кОм	Постоянная B , К • 10'	Диапазон рабочих температур, °С	Постоянная времени (не более), с
ММТ-1	1...220	20,6...43	–60...+125	85
КМТ-1	22...1000	36...72	–60... +180	85
ММТ-4	1...220	20,6...43	–60...+125	115
КМТ-4	22...1000	36...72	–60...+125	115
ММТ-6	10...100	$\geq 20,6$	–60...+125	35
КМТ-10	100...3300	≥ 36	0...+125	10
СП-17	0,33...22	36...60	–60...+100	30
СТ1-18	1,5...2200	40,5...90	–60...+300	1
СТЗ-18	0,68...3,3	22,5...32,5	–90...+125	1
СТ1-19	3,3...2200	42,3...72	–60...+300	3
СТЗ-19	2,2...15	29...38	–90...+125	3

Чувствительность термотранзистора по напряжению составляет от 1,5 до 2 мВ/К, что значительно превышает чувствительность стан-

дартных термопар. Достоинством термодиодов и термотранзисторов является высокая чувствительность, малые размеры, малая инерционность, высокая надежность и дешевизна; недостатком – узкий температурный диапазон и плохая воспроизводимость статической характеристики преобразования.

Терморезисторы применяют для измерения степени разряженности или вакуума, а также для анализа газовых смесей.

В приборах для газового анализа (газоанализаторах) для измерения теплопроводности используют перегретый платиновый терморезистор, помещенный в камеру с анализируемым газом. Конструкция терморезистора, арматуры и камеры, а также значение нагревающего тока I выбирают такими, чтобы теплообмен со средой осуществлялся в основном за счет теплопроводности газовой среды.

В последнее время появилась и быстро развивается еще одна разновидность тепловых приемников, основанная на пирозлектрическом эффекте. Он свойствен некоторым кристаллическим диэлектрикам и заключается в том, что при нагревании изменяется спонтанная поляризация и за счет этого на их противоположных поверхностях появляются заряды противоположных знаков (BaTiO_3 , LiNbO_3 , триглицинсульфат). При падении на такой диэлектрик переменного (модулированного) потока излучения в замкнутой цепи, соединяющей эти поверхности, возникает электрический ток. Особенно велик данный эффект при температурах, близких к точке Кюри, при которой происходит переход от сегнетоэлектрической фазы к несегнетоэлектрической. Пирозлектрический эффект тем больше, чем быстрее изменяется температура.

Эффект теплового расширения пьезокварца может быть также использован для измерения температуры. Классическим применением кварца является создание генераторов с очень высокой стабильностью, в частности, температурной. Для этого пластинку кварца выбирают с такой кристаллографической ориентацией, при которой влияние изменения температуры на частоту кварцевого генератора минимально. При использовании кварца в качестве датчика температуры, наоборот, пластинку вырезают с такой кристаллографической ориентацией, при которой частота генератора является квазилинейной функцией температуры. Диапазон температур таких датчиков от -80 до $+250$ $^{\circ}\text{C}$, чувствительность 1000 Гц/ $^{\circ}\text{C}$, разрешающая способность 0.0001 $^{\circ}\text{C}$.

5.3. Термоэлектрические преобразователи

Принцип действия термоэлектрического преобразователя (термопары) основан на использовании термоэлектрического эффекта Зеебека. Сущность этого явления состоит в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников или полупроводников A и B , соединив их между собой концами (рис. 5.4.), причем температуру θ_1 одного места соединения сделать отличной от температуры θ_0 другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников:

$$E_{AB}(\theta_1, \theta_0) = f(\theta_1) - f(\theta_0), \quad (5.15)$$

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем, или термопарой; проводники, составляющие термопару, – термоэлектродами, а места их соединения – спаями.

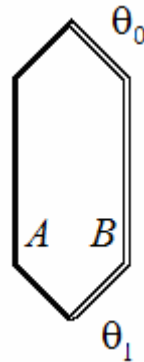


Рис. 5.4. Термоэлектрический преобразователь

Спай термопары, помещаемый в исследуемую среду, называют рабочим, или горячим, а концы, температура которых поддерживается обычно постоянной, – свободными, или холодными.

У любой пары однородных проводников значение термо-ЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температуры вдоль проводников. Термоэлектрический контур можно разомкнуть в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников. Если все новые соединения находятся при одинаковой температуре, то не возникает никаких паразитных термо-ЭДС.

Можно разомкнуть контур в месте контактирования термоэлектродов A и B и вставить дополнительный проводник C между ними (рис. 5.5. a). Значение термо-ЭДС E в этом случае определится согласно второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи как

$$E = E_{AB}(\theta_1) + E_{BC}(\theta_0) + E_{CA}(\theta_0) = E_{AB}(\theta_1) + E_{BA}(\theta_0) = E_{AB}(\theta_1) - E_{AB}(\theta_0). \quad (5.16)$$

Если два любых проводника A и B имеют по отношению к третьему C термо-ЭДС E_{AC} и E_{CB} , то термо-ЭДС термопары:

$$E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}. \quad (5.17)$$

Можно разорвать также один из термоэлектродов и вставить дополнительный проводник в место разрыва (рис. 5.5.,б). Значение термо-ЭДС в этом случае будет таким же, что и в предыдущем:

$$E = E_{AB}(\theta_1) + E_{BC}(\theta_2) + E_{CB}(\theta_2) + E_{BA}(\theta_0) = E_{AB}(\theta_1) - E_{AB}(\theta_0). \quad (5.18)$$

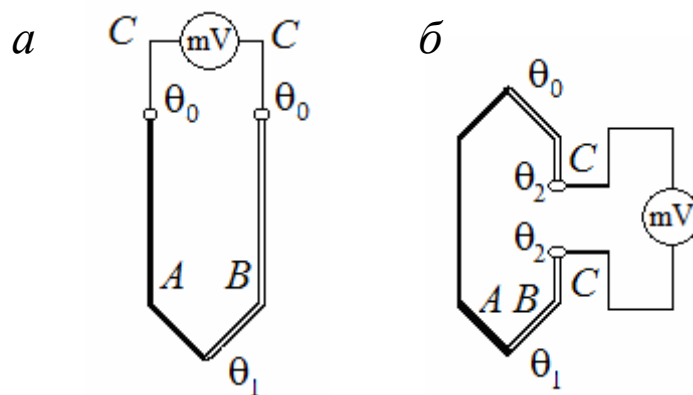


Рис. 5.5. Способы включения вольтметра в термопару, a – вместо свободного спая, $б$ – в разрыв проводника B

Итак, прибор для измерения термо-ЭДС может быть включен как между свободными концами термопары, так и в разрыв одного из термоэлектродов.

Явление термоэлектричества принадлежит к числу обратимых явлений. Обратный эффект был открыт в 1834 г. Жаном Пельтье и назван его именем. Если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то теплота выделяется в одном спаяе и поглощается в другом. Теплота Пельтье связана с силой тока линейной зависимостью, и направление или охлаждение спая зависит от направления тока через спай.

В измерительной технике термопары получили широкое распространение для измерения температур. Ниже приведены значения термо-ЭДС, которые развиваются различными термоэлектродами в паре с платиной при температуре рабочего спая 100 °С и температуре свободных концов 0 °С.

Значения термо-ЭДС некоторых материалов в паре с платиной

Материал	Термо-ЭДС, мВ	Материал	Термо-ЭДС, мВ
Кремний.....	+44,8	Ртуть.....	0,00
Хромель.....	+2,40	Палладий.....	-0,57
Нихром.....	+2,20	Цинк.....	-0,75
Железо.....	+1,80	Никель.....	-1,50
Вольфрам.....	+0,80	Алюмель.....	-1,70
Медь.....	+0,76	Константан.....	-3,40
Золото.....	+0,75	Копель.....	-4,50
Платинородий (10% родия).....	+0,64	Висмут.....	-7,70
Графит.....	+0,32	Молибденит.....	-104

Приведенные выше данные позволяют определить термо-ЭДС термоэлектрического преобразователя (составленного из любой пары термоэлектродов) как алгебраическую разность значений термо-ЭДС, развиваемых соответствующими термоэлектродными материалами в паре с платиной. Поскольку зависимость термо-ЭДС от температуры в широком диапазоне значений температуры обычно нелинейна, постольку приведенные данные нельзя распространять на более высокие температуры. Важно и то, что развиваемые термоэлектродами термо-ЭДС в значительной степени зависят от малейших примесей, механической и термической обработки (закалка, отжиг).

Стандартные термопреобразователи температуры. Для измерений температур в пределах от -200 до $+2500$ °С применяются стандартные технические термопреобразователи температуры, выпускаемые согласно ГОСТ 6616-94 (см. табл. 5.4). Градуировочные таблицы и метрологические характеристики таких преобразователей нормируются ГОСТ 3044-84.

В зависимости от назначения термоэлектрические преобразователи (ТП) делятся на погружаемые, предназначенные для преобразования температуры газообразных и жидких сред, и поверхностные, предназначенные для преобразования температуры поверхности твердого тела. В зависимости от инерционности ТП делятся на малоинерционные, средней инерционности и большой инерционности. У малоинерционных термопар показатель тепловой инерции (постоянная времени) не превышает 5 с для погружаемых и 10 с для поверхностных. У преобразователей средней инерционности – 60 с и 120 с; большой инерционности – 180 с и 300 с, соответственно.

Кроме стандартных используются также и специальные термоэлектрические преобразователи температуры. Это обусловлено стремлением расширить пределы преобразования и повысить точность, а также спецификой условий эксплуатации и технико-экономическими соображениями.

Например, для преобразования низких температур, вплоть до температуры кипения водорода, применяют медь-константановые термопреобразователи с рабочим диапазоном преобразуемых температур от -200 до $+300$ °С.

Таблица 5.3

Основные характеристики

промышленных термоэлектрических преобразователей температуры

Условное обозначение	Материалы термоэлектродов	Пределы преобразования, °С			Погрешность термо-ЭДС, нВ	
		при длительном применении		при коротком применении	до 300 °С	свыше 300 °С
		от	до			
ПП	Платинородий (10 % родия) – платина	0	1300	1600	±0,01	$\pm[0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5} \times (\theta - 300)]$
ПР-30/6	Платинородий (30 % родия) – платинородий (6 % родия)	300	1600	1800	–	$\pm [0,01 + 3,3 \cdot 10^{-5} \times (\theta - 300)]$
ХА	Хромель-алюмель	-50	1000	1300	±0,16	$\pm [0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} \times (\theta - 300)]$
ХК	Хромель-копель	-50	600	800	±0,2	$\pm [0,2 + 6,0 \cdot 10^{-4} \times (\theta - 300)]$
ВР-5/20	Вольфрамрений (5 % рения) – вольфрамрений (20 % рения)	0	1800	2500	±0,08 до 1000 °С	$\pm [0,08 + 4,0 \cdot 10^{-5} \times (\theta - 1000)]$ от 1000 до 1800 °С

Для преобразований высоких температур (свыше 1300 °С) разработаны термопреобразователи на основе тугоплавких металлов иридия, вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, а также на основе углеродистых и графитовых волокон.

Существование множества различных конструкций термоэлектрических преобразователей температуры объясняется тем обстоятельством, что их разработка велась в разное время многими предприятиями и для различных отраслей промышленности. В настоящее время созданы и внедряются унифицированные типы конструкций термопреобразователей температуры, отличающиеся универсальностью и технологичностью.

Измерительные цепи термопреобразователей. Измерительные цепи термоэлектрических преобразователей могут быть самыми разнообразными. Простейшая измерительная цепь (см. рис. 5.6, а) имеет ряд недостатков. В частности, при измерении термо-ЭДС сравнительно низкоомным милливольтметром значительное влияние на результат измерения может оказывать сопротивление соединительных линий, а также материала чувствительного элемента (термопары).

Действительно, показания милливольтметра связаны с термо-ЭДС термопары зависимостью:

$$U_{mV} = e_{\theta} - I(R_{\theta} + R_{л}) = e_{\theta} \left(1 - \frac{R_{\theta} + R_{л}}{R_{mV} + R_{\theta} + R_{л}} \right), \quad (5.19)$$

где R_{θ} – сопротивление термопары, $R_{л}$ – сопротивление соединительных линий, $R_{л} = R_{л1} + R_{л2}$, R_{mV} – сопротивление милливольтметра.

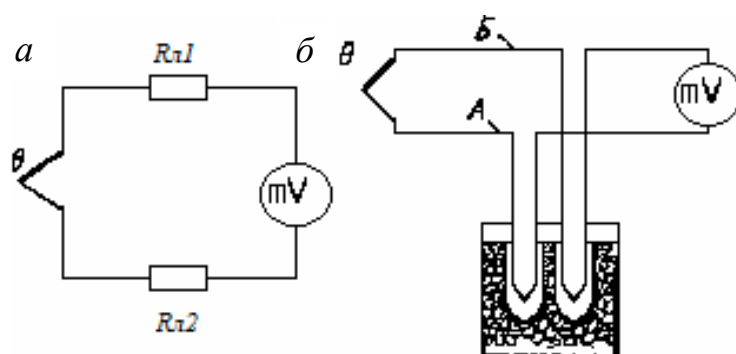


Рис. 5.6. Измерительные цепи термоэлектрических преобразователей:
а – простейшая схема, *б* – схема с термостатированием

Из выражения (5.19) следует, что погрешностью влияния сопротивлений R_θ и R_λ можно пренебречь лишь в том случае, когда $R_\theta + R_\lambda \ll R_{mV}$. Полностью устранить влияние этих сопротивлений на результат измерения можно лишь при измерении температуры компенсационным методом.

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов, равной нулю. Если в процессе измерения температура свободных концов отличается от нуля, то возникают дополнительные погрешности, устранить которые можно путем термостатирования свободных концов (см. рис. 5.6, *б*). Следует отметить, что термоэлектроды не всегда удастся сделать достаточно длинными, чтобы можно было осуществить термостатирование свободных концов. Кроме того, для термопар из благородных металлов делать длинными термоэлектроды экономически нецелесообразно. В этих случаях используют так называемые удлинительные термоэлектроды *A* и *B* (рис. 5.6, *б*), идущие от зажимов в головке термопары до места нахождения свободных концов в термостате.

Материалы удлинительных термоэлектродов должны быть термоэлектрически идентичны основной термопаре в диапазоне темпе-

ратур от 0 до 200 °С, и места их присоединения к основным термоэлектродам должны иметь одинаковую температуру. При выполнении указанных условий измеряемая термо-ЭДС практически не будет зависеть от температуры мест присоединения удлинительных проводов к основной термопаре.

Для термопары платинородий-платина применяют удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, для термопары хромель-алюмель – из меди и константана, а для термопары хромель-копель – из тех же материалов, что и основные термоэлектроды.

6. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

6.1. Физические основы оптических измерений

Оптический преобразователь измеряемой величины X_1 или X_2 в выходную электрическую величину I содержит источник излучения светового потока Φ_1 , некоторый оптический канал и приемник излучения, воспринимающий поток Φ_2 и преобразующий его в выходной электрический сигнал I (см. рис. 6.1).

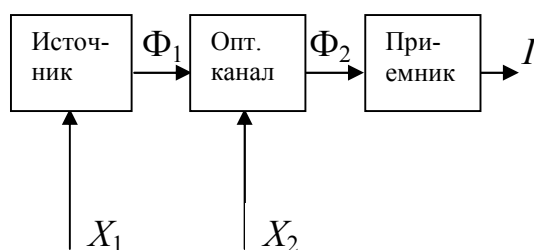


Рис. 6.1. Блок-схема оптического прибора

Воздействие входной величины X на поток излучения Φ_2 может осуществляться двумя путями. В первом случае измеряемая величина X_1 воздействует непосредственно на источник и изменяет тот или иной параметр излучаемого потока Φ_1 . Во втором случае измеряемая величина X_2 модулирует соответствующий параметр потока Φ_2 в процессе его распространения по оптическому каналу. Поэтому для уяснения общих принципов действия оптических преобразователей ниже будут рассмотрены законы оптического излучения и взаимодействия его с веществом, основные характеристики источников и приемников излучения, а также примеры наиболее распространенных преобразователей.

Основные свойства оптического излучения. Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, длина кото-

рых лежит в диапазоне от 0.001 до 1000 мкм. Оно включает ультрафиолетовое (1-380 нм), видимое (380-780 нм), инфракрасное (0.78-1000 мкм) излучения. К коротковолновой части спектра примыкает рентгеновское и γ -излучение, а к длинноволновой – радиоволны.

Кроме длины волны λ , которой обычно пользуются в технике и экспериментальной физике, излучение можно охарактеризовать и другими величинами. В теоретической физике применяют частоту ν – число колебаний в единицу времени:

$$\nu = c/\lambda, \quad (6.1)$$

где c – скорость света в вакууме, $c = 2.998 \cdot 10^8$ м/с

В инфракрасной спектроскопии пользуются волновым числом, т. е. числом длин волн, укладывающихся в единице длины:

$$n = 1/\lambda. \quad (6.2)$$

Следует отметить, что частота является более универсальной характеристикой, т. к. длина волны меняется в оптических средах вследствие изменения скорости света, тогда как частота остается постоянной. Электромагнитное излучение, в т. ч. и оптическое, распространяется в веществе со скоростью $\nu = c/n$, где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления. Показатель преломления воздуха $n = 1.0003$, поэтому скорость света в атмосфере незначительно отличается от скорости света в вакууме. Постоянство скорости света в вакууме (и с некоторым приближением в атмосфере) используется для измерения расстояний. При измерении больших расстояний измеряется время, необходимое для прохождения светом расстояния до объекта измерения и обратно (световые локаторы, светодальномеры).

При измерениях малых расстояний удобнее сравнивать их с длиной световой волны, используя фазовые или интерференционные методы.

Прохождение оптического излучения через вещество характеризуется поглощением и рассеянием. Интенсивность пучка параллельных лучей при прохождении слоя среды толщиной x убывает вследствие поглощения по закону Ламберта–Бугера $\Phi_x = \Phi_0 \cdot \exp(-k_\lambda x)$. Коэффициент поглощения k_λ зависит от длины волны (селективность или избирательность поглощения). Величина $D = \lg(\Phi_0/\Phi_x)$ называется оптической плотностью, измеряется с помощью спектрофотометров и связана с коэффициентом поглощения следующим образом:

$$k_\lambda = (\ln 10) \cdot D/x = 2.303 \cdot D/x \quad (6.3)$$

Кроме того, часто для характеристики прозрачности вещества используют величину коэффициента пропускания $T = \Phi_x/\Phi_0 \cdot 100\%$.

Коэффициент поглощения k_λ зависит от концентрации раствора C следующим образом:

$$k_\lambda = \chi_\lambda \cdot C, \quad (6.4)$$

где χ_λ – коэффициент, определяемый свойствами молекул растворенного вещества и длиной волны света. При прохождении оптического излучения через мутное вещество (туман, дым, жидкость, содержащая взвешенные частицы) часть света рассеивается в стороны. Поэтому для мутных веществ ослабление светового потока описывается выражением

$$\Phi_x = \Phi_0 \cdot \exp[-(k_\lambda + k_\lambda') x], \quad (6.5)$$

где $k_\lambda + k_\lambda' = \mu$ – коэффициент ослабления, k_λ' – коэффициент рассеяния, величина которого зависит от длины волны света и размера рассеивающих частиц. Изменение интенсивности поглощения и ослаб-

ления в зависимости от толщины слоя, размера рассеивающих частиц, а также селективность поглощения лежат в основе целого ряда оптических преобразователей, предназначенных для определения толщины, уровня, концентрации, структуры и химического состава веществ, размера рассеивающих частиц (нефелометрия).

На границе раздела двух прозрачных сред, имеющих разные коэффициенты преломления, световое излучение претерпевает преломление (рефракцию) и отражение (см. рис. 6.2.)

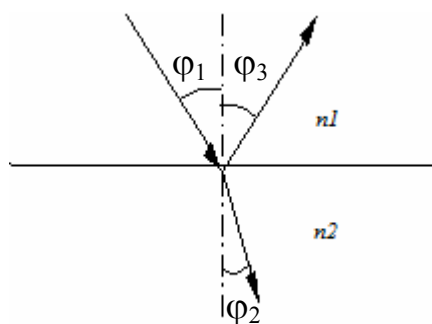


Рис. 6.2. Оптические эффекты на границе сред

Между углами падения φ_1 , преломления φ_2 и отражения φ_3 существует простая связь:

$$\varphi_1 = \varphi_3; \quad n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2, \quad (6.6)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления сред до и после границы раздела.

Коэффициент преломления n прозрачной среды убывает с ростом длины волны. Следовательно, при одном и том же угле падения световые лучи больших длин волн преломляются под большими углами. Это свойство используется в спектральных приборах для разложения и анализа сложного по спектральному составу света. Изме-

ряя углы падения и преломления, можно измерять коэффициенты преломления веществ и т. д.

Электромагнитные волны, в т. ч. и световые, являются поперечными, и важной характеристикой оптического излучения является плоскость поляризации, т. е. плоскость, в которой лежит вектор напряженности электрического поля E и направление электромагнитной волны. Для многих веществ показатель преломления и скорость распространения имеют различные значения в зависимости от ориентации плоскости поляризации (оптическая анизотропия). Данное явление используется для ориентации кристаллов и получения линейно поляризованного света. Оптически активные вещества (сахар, высокомолекулярные вещества) способны поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света прямо пропорционально концентрации и толщине слоя.

Оптическая анизотропия и активность могут вызываться механическими напряжениями, электрическим и магнитным полем. Поэтому поляризационно-оптические преобразователи широко используются для измерения механических напряжений методом фотоупругости, а также для построения безынерционных (10^{-9} - 10^{-10} с) модуляторов света, управляемых электрическим (эффект Керра) и магнитным полем.

Свойства электромагнитного излучения, в т. ч. и оптического диапазона, меняются в зависимости от длины волны. Человеческий глаз устроен так, что изменение длины волны в пределах видимой области воспринимается как изменение цветности излучения. Вообще же при рассмотрении взаимодействия излучения с веществом можно

прийти к следующим общим выводам. Излучение с любой длиной волны при его поглощении веществом может перейти в тепло. Однако для коротковолнового излучения (например, ультрафиолетового) велика вероятность того, что его энергия частично или полностью не перейдет в тепло, а вызовет *фотоэффект*, произведет *фотохимическое действие*, возбудит *фотолюминесценцию*.

Сейчас принято считать, что свет имеет волновую и корпускулярную природу. В корпускулярном аспекте свет рассматривается, когда идет речь о взаимодействии с веществом. Свет, как и все другие виды электромагнитного излучения, представляется состоящим из частиц – фотонов, каждый из которых несет элементарную энергию E , определяемую только частотой излучения ν :

$$E = h\nu, \quad (6.7)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

В металлах электроны удерживаются внутренним потенциальным полем и для того, чтобы преодолеть границу вещества, они должны получить энергию, превышающую величину поверхностного потенциального барьера $E_{\text{пов}}$. Столкновение фотонов с электронами повышает кинетическую энергию последних, позволяя тем покидать пределы вещества при условии $E \geq E_{\text{пов}}$ (*внешний фотоэффект*). Максимальная длина волны света, способного выбить с поверхности металла электроны, называется пороговой длиной волны $\lambda_{\text{кр}}$, или красной границей внешнего фотоэффекта:

$$\lambda_{\text{кр}} = hc / E_{\text{пов}}. \quad (6.8)$$

В полупроводниках и диэлектриках при определенных условиях возможен так называемый *внутренний фотоэффект*, заключающийся в передаче энергии фотона электрону из зоны разрешенных состояний и перевод его в зону свободных состояний при условии, что поглощенной энергии достаточно для такого перехода.

В более общем плане тип освобожденных световым излучением носителей заряда зависит от природы освещаемого материала:

- электронно-дырочные пары в изоляторах и беспримесных полупроводниках;
- электроны в примесных полупроводниках с донорными уровнями;
- дырки в полупроводниках с акцепторными уровнями.

Для описания оптических явлений применяют три системы величин: энергетическую (радиометрическая, диапазон: от 1 нм до 1 мм), световую (фотометрическая, диапазон: от 380 до 780 нм) и квантовую.

Фотометрические единицы. Основной единицей *мощности* или *светового потока* в фотометрической, или световой системе является *люмен*. Как и все фотометрические измерения, люмен основывается на дневном зрении глаза, которое имеет максимум чувствительности при 555 нм.

Энергия световой волны, измеряемая в люмен-секундах и излучаемая источником в виде светового потока за определенное время, называется *световой энергией*. Световой поток, излучаемый точечным источником в единичный телесный угол, называется *силой света*. Он измеряется в *канделах*, или лм/ср. Плотность светового пото-

ка, падающего на единичную площадку, называется *освещенностью*, она измеряется в *люксах*, или $\text{лм}/\text{м}^2$. Приведем примерные значения освещенности:

- яркий солнечный свет – 10^5 лк;
- лунный свет – 10^{-1} лк;
- звездный свет – 10^{-3} лк.

На практике ни один источников света не является точечным. Однако если диаметр источника менее 0.1 расстояния от источника до приемника, то его можно считать точечным. Для протяженного источника сила света в любом направлении обеспечивается многими точками на поверхности источника. В этом случае мерой интенсивности света служит *яркость*. Она определяется как сила света, излучаемого единичной площадкой, которая является проекцией соответствующей части поверхности источника на плоскость, перпендикулярную выбранному направлению распространения излучения. Для примера можно привести уровни яркости некоторых источников:

- взрыв атомной бомбы – $2 \cdot 10^{12}$ кд/ м^2 ;
- молния – $7 \cdot 10^7$ кд/ м^2 ;
- лампа с вольфрамовой нитью – $9 \cdot 10^5$ кд/ м^2 ;
- Солнце (с Земли) – $2 \cdot 10^4$ кд/ м^2 ;
- люминесцентная лампа – $7 \cdot 10^3$ кд/ м^2 ;
- Луна – $2 \cdot 10^3$ кд/ м^2 .

Радиометрические единицы. Основной единицей *мощности* в радиометрической или энергетической системе является ватт. Он является мерой энергетического потока. *Энергия излучения* измеряется в джоулях. Энергетический поток, излучаемый точечным ис-

точником в единичный телесный угол, называется *энергетической силой света*, единица измерения которой – Вт/ср. Плотность потока излучения, падающего на единичную площадку, называется *энергетической освещенностью*, или *облученностью*. Энергетическая сила света, покидающего единичную поверхность и падающего на нее в заданном направлении, называется *энергетической яркостью*, единица измерения которой – Вт/(м²·ср). Основные энергетические и световые величины и единицы их измерения представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Единицы измерения основных энергетических и световых величин

Параметр	Единицы	
	световые	энергетические
Световой поток и мощность света	Люмен (лм)	Ватт (Вт)
Сила света и сила излучения	Кандела (кд = лм/ср)	Ватт/стерадиан (Вт/ср)
Яркость	кд/м ²	Вт/(ср·м ²)
Освещенность и облученность	лм/м ² = люкс (лк)	Вт/м ²
Энергия	лм·с	Дж

Если для характеристики оптических явлений нет необходимости в указании конкретных единиц, то часто пользуются общим понятием «интенсивность света», под которым может подразумеваться поток, сила света, яркость и т. д.

Световые величины используются для оценки излучения по производимому им световому ощущению, т. е. по реакции человеческого глаза, и связь между энергетическими и световыми величинами устанавливают через относительную спектральную чувствительность глаза V_λ или, что одно и то же, через относительную спектральную световую эффективность. Для нормального глаза $V_\lambda = 1$ при $\lambda = 555$ нм. По мере приближения к краям видимого оптического излучения (380 и 780 нм) величина V_λ плавно снижается до нуля (рис. 6.3). Из рис. 6.3 также видно, что кривая спектральной чувствительности глаза для сумеречного освещения имеет максимум при 515 нм и сдвинута относительно кривой для дневного освещения в коротковолновую область.

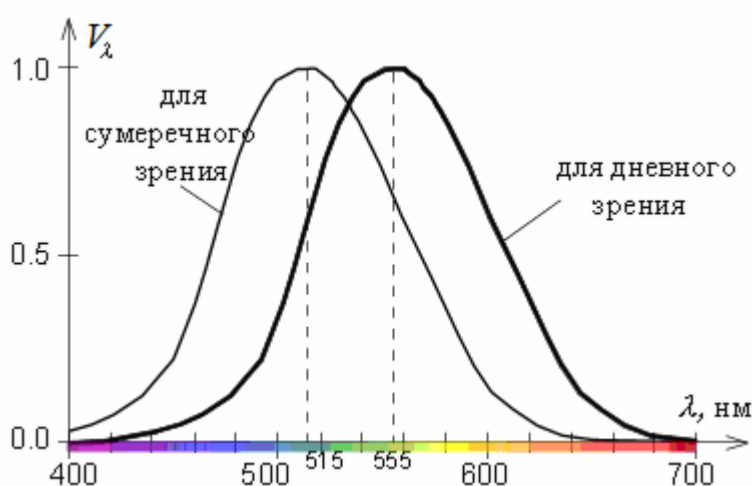


Рис. 6.3. Кривая относительной спектральной чувствительности глаза.

Если известна функция распределения мощности излучения по длинам волн P_λ (спектральная плотность потока излучения), то видимый световой поток в люменах равен

$$\Phi = 683 \int_{0.4}^{0.8} V_\lambda \cdot P_\lambda d\lambda. \quad (6.9)$$

Как следует из приведенной формулы, световому потоку 1 лм соответствует разная мощность в зависимости от спектрального состава света; в области максимальной чувствительности эквивалент энергетического потока равен 683 лм/Вт.

Тепловое и световое излучения. Интенсивность потока электромагнитного излучения характеризуется мощностью P в ваттах, переносимой излучением всех длин волн, присутствующих в потоке. Характеристикой излучающих тел является энергетическая светимость $R = dP/dS$, т. е. поток, излучаемый единицей поверхности, Вт/м². Указанные величины, отнесенные к единичному интервалу длин волн (вблизи длины волны λ), называются соответственно спектральной плотностью потока P_λ , Вт/нм, и светимости R_λ , Вт/(м²·нм).

При тепловом излучении спектральная светимость любого тела определяется из закона Кирхгофа

$$R_\lambda = d^2P/(dSd\lambda) = a_\lambda R_\lambda^*, \quad (6.10)$$

где a_λ – коэффициент поглощения тела на данной длине волны, зависящий главным образом от свойств тела, R_λ^* – спектральная светимость некоторого гипотетического тела, обладающего способностью поглощать полностью падающее излучение любой длины волны (т. е. $a_\lambda \equiv 1$) и называемого поэтому абсолютно черным телом (АЧТ). По

формуле Планка светимость R_{λ}^* определяется однозначно его абсолютной температурой

$$R_{\lambda}^* = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2/\lambda T) - 1], \quad (6.11)$$

где $C_1 = 2\pi h c^2 = 3.7415 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², $C_2 = hc/k = 1.4388 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Максимальное значение спектральной светимости АЧТ, составляющее $R_{\lambda}^*_{\max} = 1.301 \cdot 10^{-5} \cdot T^5$, приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 2886/T$ в мкм (закон Вина), а его интегральная светимость, т. е. площадь, ограниченная спектральной кривой равна $R^* = \sigma T^4$ (закон Стефана-Больцмана).

Эти фундаментальные законы позволяют использовать оптические методы для бесконтактного измерения температуры АЧТ, а при известном a_{λ} и для измерения температуры любого реального тела.

Люминесцентное излучение. Наиболее простым по спектральному составу является излучение веществ в газообразном или парообразном состоянии. Так как атомы и молекулы газа характеризуются строго индивидуальным и дискретным набором значений внутренней энергии E_i , то газы и пары обнаруживают значительное поглощение (а следовательно, и излучение) только на резонансных частотах $\nu_{0i} = E_i/h$ или при длинах волн $\lambda_{0i} = hc/E_i$. Поэтому тонкие слои газов и паров характеризуются линейчатыми спектрами поглощения и излучения.

Резонансные частоты излучения, или люминесценции некоторых элементов обнаруживают весьма высокую стабильность и воспроизводимость, что позволяет использовать их в качестве образцовых мер длины (красная линия кадмия, оранжевая линия криптона). Исследование спектров излучения и поглощения веществ в газо- или

парообразном состоянии позволяет производить качественный (по положению линий в спектре) и количественный (по интенсивности линий) спектральный анализы.

6.2 Источники оптического излучения

Источники излучения подразделяются на тепловые и люминесцентные. К тепловым относятся лампы накаливания, газоразрядные лампы сверхвысокого давления, к люминесцентным – газоразрядные лампы, электролюминофоры, светодиоды и лазеры. Основными параметрами источников излучения являются характер свечения (непрерывный или импульсный), спектральный состав излучения, мощность излучения (световой поток, сила света, яркость), потребляемая мощность (напряжение и ток питания), габариты.

Лампы накаливания имеют непрерывный спектр излучения, охватывающий видимую и инфракрасную области. Мощность излучения ламп накаливания относительно невелика, спектральный состав и интенсивность свечения зависят от температуры нити, определяемой напряжением и током питания. Характер свечения непрерывен во времени.

Газоразрядные лампы дают свечение в результате прохождения тока через газ или пар и представляют собой кварцевый или стеклянный баллон, заполненный газом или паром. Различают газоразрядные источники дугового, тлеющего и импульсного разрядов. Электрический разряд особенно в дуговых лампах сопровождается интенсивным световым излучением. Газоразрядные лампы имеют линейчатый спектр излучения. Наибольшее применение нашли ртутные и ксено-

новые лампы. К недостаткам газоразрядных ламп относятся большие габариты и сложность схем включения.

Лазеры бывают нескольких разновидностей: газовые, эксимерные, твердотельные и полупроводниковые. В состав лазерного источника света обычно входит блок излучателя и блок питания. Параметры излучения зависят от излучателя, а также от режима излучения лазера, который может быть непрерывным импульсным, а также одиночных импульсов.

В измерительной технике наибольшее распространение получили газовые лазеры (гелий-неоновые, $\lambda = 632.8$ нм), излучение которых обладает высокой степенью монохроматичности, когерентности, поляризованности и малой расходимостью пучка (не более $10'$).

Все более широкое применение находят полупроводниковые лазеры из арсенида галлия и индия, примесного кремния и др. Основным их преимуществом является высокий КПД (80-90 %) и простота возбуждения и модуляции оптического излучения.

Светодиоды представляют собой излучающий *p-n* переход и являются весьма удобными миниатюрными источниками света, но, в отличие от лазеров, не имеют оптических резонаторов. Поэтому их излучение не когерентно, ширина линии излучения составляет 10-20 нм, положение максимума зависит от материала светодиода и примеси.

6.3. Приемники оптического излучения

Приемники оптического излучения можно разделить на две большие группы: тепловые и фотоэлектрические. К тепловым приемникам относят термоэлементы и болометры, принцип действия кото-

рых основан на предварительном преобразовании энергии оптического излучения в тепловую энергию. К фотоэлектрическим приемникам, с общим названием «фотоэлементы», относятся преобразователи, в которых используются явления внешнего и внутреннего фотоэффекта: вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, фотоумножители, фоторезисторы, фотодиоды, вентильные и фотогальваномагнитные фотоэлементы, фототранзисторы и фототиристоры.

6.3.1. Тепловые приемники

Для тепловых приемников излучения первичным процессом является преобразование энергии поглощенного света в энергию теплового возбуждения кристаллической решетки, которое вызывает повышение температуры приемника, приводящее к изменению его электрических свойств.

К электрическим величинам, которые с успехом могут использоваться для измерения потока излучения, относятся:

- сопротивление металлического или полупроводникового элемента (болометры);
- термо-ЭДС (эффект Зеебека);
- спонтанная электрическая поляризация пироэлектриков.

Поглощению излучения способствует чернение приемной поверхности соответствующим покрытием (например, платиновой чернью), излучательная способность которого ϵ близка к 1. Коэффициент поглощения черненной поверхности мало отличается от единицы в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения, если слой черни имеет толщину (до 30-40 мкм), превышающую величину

максимальных длин волн, на которые рассчитан приемник. Таким образом, выходная величина приемника пропорциональна интегральной мощности P_x падающего на его площадку излучения и не зависит от спектрального состава этого излучения.

6.3.2. Фотэмиссионные детекторы

К фотэмиссионным детекторам относят вакуумные и газонаполненные фотоэлементы (ФЭ), а также фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Их принцип действия основан на так называемом внешнем фотоэффекте, который был открыт Г. Герцем в 1887 г., исследован в А.Г. Столетовым в 1888 г. и объяснен А. Эйнштейном в 1905 г.

Вакуумный фотоэлемент состоит из откачанной и отпаянной стеклянной или кварцевой трубки, в которую помещены катод K и анод A . Пусть на катод попадают кванты света, энергия которых $h\nu$ больше работы выхода $A_{\text{вых}}$ электронов. В этом случае электроны будут выбиваться из катода. Их кинетическая энергия определяется уравнением Эйнштейна:

$$E_{\text{кин}} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (6.12)$$

Количество таких электронов (их называют фотоэлектронами) прямо пропорционально (случай монохроматического света) количеству падающих фотонов. Отношение этих величин называют квантовым выходом η . Под действием напряжения, приложенного между катодом и анодом, электроны летят к аноду и вызывают во внешнем контуре ток I . Он, как и падение напряжения U_R на рабочем сопротивлении R , пропорционален потоку излучения P_x , падающему на катод (см. рис. 6.4.)

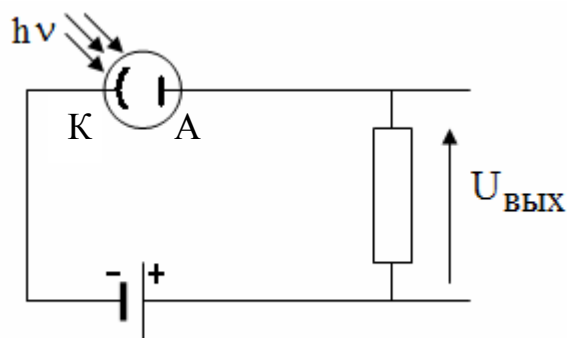


Рис. 6.4. Схема включения вакуумного фотоэлемента

Газонаполненные фотоэлементы отличаются от вакуумных тем, что они заполнены инертным газом. Благодаря этому первичные электроны, ускоренные электрическим полем, ионизуют атомы газа, освобождая вторичные электроны. При этом возникают так называемые электронные лавины, а первичный ток усиливается в сотни раз. В то же время положительные ионы очень медленно перемещаются к катоду, поэтому верхняя граничная частота данных детекторов значительно ниже, чем у вакуумных фотоэлементов (десятки МГц), и не превышает 10 кГц.

Особо следует подчеркнуть, что фотоэлементы, в отличие от тепловых приемников, являются селективными преобразователями, поэтому выходная величина фотоэлементов определяется наряду с интенсивностью падающего на них излучения и его спектральным составом. Спектральная чувствительность фотоприемников, основанных на внешнем фотоэффекте, не является постоянной. Она уменьшается в длинноволновой области из-за наличия энергетического барьера (красная граница) при генерации фототока. Снижение чувствительности в коротковолновой области связано с конечной толщи-

ной фотокатода, с одной стороны, поглощением фотонов с увеличивающейся энергией, с другой стороны. В толстых фотокатодах уменьшается вероятность выхода фотоэлектронов из внутренних областей. Однако специальным подбором материалов фотокатодов удастся создать ФЭ отдельно для вакуумного ультрафиолета (ВУФ), ультрафиолета (УФ) и инфракрасной (ИК) области в спектральном диапазоне от 100 до 1200 нм.

Фотоэлектронный умножитель (рис. 6.5) устроен таким образом, что в одной и той же откачанной колбе находятся обычный фотоэлемент и усилитель фототока, который основан на явлении вторичной электронной эмиссии и конструктивно оформлен в виде системы дополнительных электродов – динодов. В таком приборе первичный фототок может усиливаться в 10^3 - 10^9 раз при небольшом уровне шума в широком интервале рабочих частот.

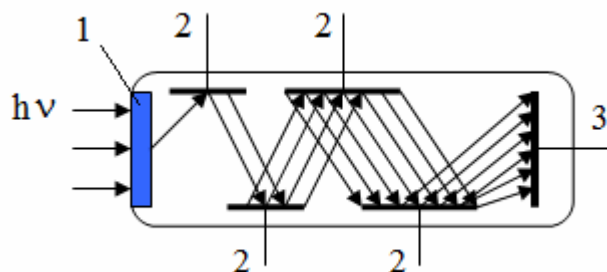


Рис. 6.5. Фотоумножитель:
1 – фотокатод, 2 – диноды, 3 – анод

Электроны, выбитые с фотокатода (потенциал V_k) под действием падающего света, ускоряются электрическим полем и попадают на первый динод (потенциал $V_1 > V_k$). Ускоренные первичные электроны обладают достаточно высокой энергией и вызывают вторичную эмиссию электронов с первого динода. Отношение количества вторичных электронов к количеству первичных электронов называют

коэффициентом вторичной эмиссии δ . Он зависит от материала динода, угла падения первичных электронов и от обработки поверхности. Коэффициент вторичной эмиссии возрастает с увеличением кинетической энергии падающих электронов. При 200 эВ этот коэффициент для наиболее распространенных материалов динодов составляет от 1.4 до 14.

Вторичные электроны с первого динода ускоряются и попадают на второй динод. Процесс размножения электронов повторяется до последнего динода в умножителе. Если такой прибор содержит N динодов, то фототок между катодом и первым динодом I связан с током анода I_a следующим соотношением:

$$I_a = \delta_1 \delta_2 \dots \delta_N I. \quad (6.13)$$

Световые характеристики фотоумножителей при малых анодных токах (несколько микроампер) весьма близки к линейным. Явление вторичной эмиссии практически безынерционно, поэтому фотоумножители, как и вакуумные фотоэлементы, могут использоваться для регистрации весьма быстропротекающих процессов (до 10^{-9} с).

6.3.3. Полупроводниковые детекторы

Фоторезисторы чувствительны к световому излучению благодаря внутреннему фотоэффекту, заключающемуся в перераспределении электронов по энергетическим состояниям за счет поглощенных фотонов. При этом растет концентрация носителей тока внутри вещества и появляется дополнительная проводимость – фотопроводимость. Поглощение фотонов может происходить как в основном веществе – собственный фотоэффект, так в примесях – примесный фо-

тоэффект. Примерами фоторезисторов с собственной проводимостью могут служить приборы из селена, соединений селена с серой, теллура со свинцом, висмутом, таллием или кадмием. Примесные фоторезисторы изготавливают в основном из германия и кремния, которые легированы золотом, медью, свинцом, индием и др. Световая характеристика фоторезисторов, как правило, не линейна. У них большая, чем у вакуумных фотоэлементов, инерционность и зависимость чувствительности от температуры. Достоинством, обуславливающим их применение, является широкий спектральный диапазон фоторезисторов от 0.5 до 150 мкм. При этом следует иметь в виду, что в длинноволновой ИК области можно работать только с глубоко охлажденными приемниками – вплоть до азотных (80 К) или гелиевых (4 К) температур. Это обстоятельство принципиальное, общее для всех фотоэлектрических приборов: дело в том, что энергия фотонов в данной области спектра очень мала и соизмерима с той энергией, которую электрон может получить в результате тепловых колебаний, поэтому при обычных температурах фототок практически не отличим от темнового фототока, обусловленного тепловыми процессами.

Одним из способов пространственного разделения дырок и электронов, возбуждаемых светом, является воздействие на полупроводник магнитного поля (гальваномагнитный эффект).

Гальваномагнитный фотоэлемент (см. рис. 6.6) состоит из полупроводникового монокристалла, размещенного между полюсами постоянного магнита. Поток излучения, поглощаемой поверхностью кристалла, создает вблизи поверхности повышенную концентрацию электронно-дырочных пар, которые диффундируют вглубь кристалла.

Движущиеся электроны и дырки отклоняются магнитным полем в разные стороны, и между электродами, которые расположены в плоскостях, параллельных линиям магнитного поля и падающему световому потоку, устанавливается разность потенциалов. Направления магнитных силовых линий и светового потока взаимно перпендикулярны.

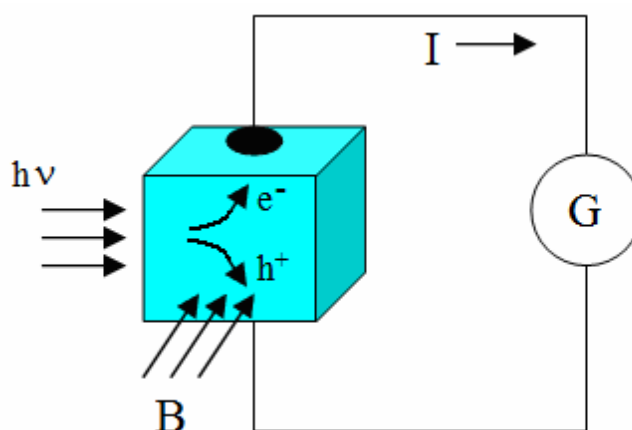


Рис. 6.6. Гальваномагнитный фотоэлемент

Основным достоинством гальваномагнитных фотоэлементом является возможность измерения инфракрасных излучений (максимум чувствительности при $\lambda_{\max} = 6.2$ мкм) при весьма малой инерционности, не превышающей 0.2 мкс, что недоступно для других фотоэлементов и термопреобразователей.

Особый практический интерес представляет проявление фотоэффекта в полупроводниках с p - n -переходом. Благодаря объемному заряду, который образуется вблизи границы p - и n -областей, возникает потенциальный барьер для носителей тока. При поглощении излучения в результате внутреннего фотоэффекта образуются дополнительные носители заряда, которые изменяют потенциальный рельеф и

создают ЭДС. Данный эффект носит название вентильного, или фотогальванического.

Вентильный фотоэлемент (см. рис. 6.7) представляет собой полупроводниковый диод, один из электродов которого является полупрозрачным. Световой поток Φ_x проходит через полупрозрачный электрод, тонкий слой полупроводника n -типа и поглощается в прилегающей к нему части пластинки полупроводника p -типа. В ней вследствие фотоэффекта образуется повышенная концентрация электронно-дырочных пар. Электроны увлекаются ускоряющим полем потенциального барьера и проникают в слой n -полупроводника.

Сопротивление p – n -перехода в обратном направлении $R_{обр}$ составляет десятки килоом, поэтому избыток основных носителей (дырок) в p -области снижает величину ее электрического сопротивления r . Сопротивление $R_{обр}$ резко уменьшается с ростом светового потока Φ_x , т. к. высота потенциального барьера p – n -перехода снижается на значение фото-ЭДС (падение напряжения на сумме сопротивлений p -слоя r и нагрузки R_H).

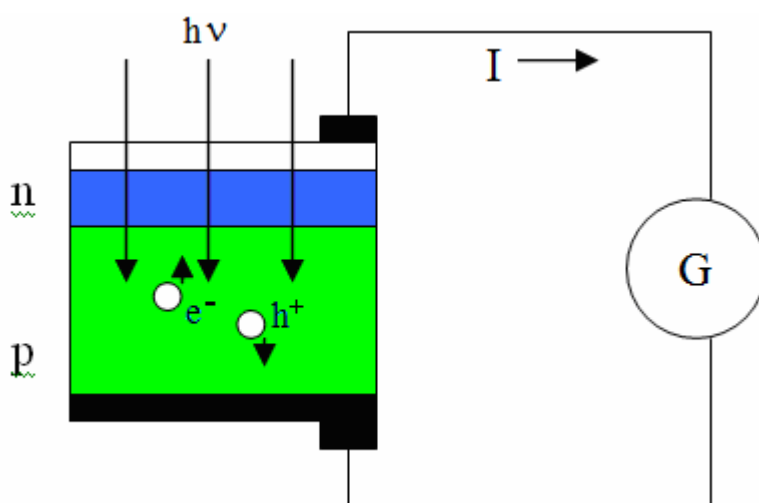


Рис. 6.7. Принцип действия вентильного фотоэлемента.

Таким образом, фото-ЭДС не может превышать величину указанного потенциального барьера, который составляет от 0.1 до 0.3 В.

Вентильный элемент можно рассматривать как источник тока $I_\Phi = k\Phi$, но в нагрузку потечет лишь ток

$$I_n = I_\Phi R_{\text{обр}}(\Phi) / [R_{\text{обр}}(\Phi) + r + R_n] = k\Phi / [r + R_n / R_{\text{обр}}(\Phi) + 1]. \quad (6.14)$$

Ток в нагрузке линейно зависит от потока Φ только при $r + R_n \ll R_{\text{обр}}$, т. е. при малых значениях потока и малых значениях сопротивления нагрузки ($R_n \approx 1 \div 100$ Ом). При больших световых потоках $R_{\text{обр}} < r$ световые характеристики нелинейны даже в режиме короткого замыкания.

Инерционность селеновых фотоэлементов настолько велика, что они могут использоваться только для измерения слабо изменяющихся во времени световых потоков. Кривые спектральной чувствительности селеновых фотоэлементов близки к аналогичной характеристике глаза. Поэтому данный тип датчиков широко применяется в фотометрической аппаратуре (люксметры, экспонометры).

Фотодиоды представляют собой вентильные фотоэлементы, к которым приложено обратное напряжение (от 10 до 30 В) от внешнего источника. При таком включении потенциальный барьер возрастает и определяется внешним напряжением. Условия проникновения неосновных носителей из освещенной зоны через барьер существенно облегчаются, а обратное сопротивление этого перехода резко возрастает. Вследствие этого возрастает чувствительность, а световые характеристики в широком диапазоне световых потоков становятся строго линейными. При работе в фотодиодном режиме ток, протекающий через нагрузку, способен создавать падение напряжения, со-

измеримое с напряжением питания, при этом величина тока мало зависит от последнего. Наибольшее практическое значение имеют германиевые (от 400 до 2000 нм, $\lambda_{\max} = 1500$ нм) и кремниевые (от 400 до 1000 нм, $\lambda_{\max} = 900$ нм) фотодиоды.

Фототранзисторы используют усилительные свойства комбинированных *p-n-p* и *n-n-p* структур. С их помощью величина фототока, возникающего в одном из полупроводниковых переходов, включенном в обратном направлении, усиливается в десятки раз (коллекторный переход). Эти преобразователи имеют световой вход в области базы транзистора и включаются по схеме с общим эмиттером.

В заключение необходимо отметить, что до сих пор одним из самых совершенных фотоприемников в диапазоне от 380 до 780 нм является человеческий глаз. Глаз содержит два типа чувствительных к свету элементов, называемых колбочками и палочками. Общее число палочек в сетчатке составляет 130 млн. Они определяют светочувствительность глаза. Каждые 10 палочек связаны со зрительным нервом, по которым и передаются электрические сигналы. Колбочки менее чувствительны и наиболее активны при нормальных условиях освещения, именно, они преимущественно обеспечивают различение цветов и высокую разрешающую способность.

Техническим аналогом человеческому глазу являются *приборы с зарядовой связью* (ПЗС), нашедшие широкое применение в цифровой фото- и видеоаппаратуре. Однако даже в самых совершенных ПЗС-матрицах насчитывается лишь несколько миллионов чувствительных элементов, что в десятки тысяч раз меньше числа нервных окончаний человеческого глаза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев А.А. Физические основы измерений : учебник для студ. высш. учеб. заведений. М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 240 с.
2. Шишмарев В.Ю. «Технические измерения и приборы»: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 384 с.
3. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. под ред. Е. Л. Свинцова М. : «Техносфера», 2005. – 578 с.
4. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. М.: Радио и связь, 2006. – 95 с.
5. Камке Д. Физические основы единиц измерения / Д. Камке, К. Кремер. – М. : Мир, 1980. – 208 с.
6. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи): учебное пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
7. Основы метрологии и электрические измерения : учебник для вузов / Б. Я. Авдеев и др.; под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. – Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1987. – 480 с.
8. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерения: учебное пособие для вузов / С. А. Спектор – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1987. – 320 с.
9. Хофманн Д. Техника измерения и обеспечение качества : справочник: пер. с нем. / Д. Хофманн – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ	6
2. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ	7
2.1. Физические величины и единицы измерения	7
2.2. Физические основы базисных эталонов единиц измерений	9
2.3. Основные функции измерительной системы	15
2.4. Определение измерения и следствия из него	18
2.5. Классификация средств измерений	19
2.6. Виды и методы измерений	21
2.7. Измерение параметров электрических цепей	24
2.7.1 Мостовой метод измерения. Теория мостовых схем	24
2.7.2. Резонансный метод измерения параметров двухполюсника	29
3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ	32
3.1. Закон Гейзенберга	32
3.2. Шумы	38
3.2.1. Влияние броуновского движения на показания гальванометра	38
3.2.2. Тепловой шум	42
3.2.3. Дробовой эффект	46
3.2.4. Квантовый шум	49
4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	52
4.1. Измерительные преобразования и измерительные преобразователи	52
4.2. Характеристики измерительных преобразователей неэлектрических величин	56
4.3. Классификация преобразователей	57
4.4. Резистивные преобразователи механических величин	60
4.4.1. Контактные преобразователи	60
4.4.2. Реостатные измерительные преобразователи	62
4.4.3. Тензометрические преобразователи (тензорезисторы)	65
4.5. Электромагнитные преобразователи	71
4.5.1. Индуктивные, взаимоиндуктивные, магнитоупругие преобразователи	71
4.5.2. Индукционный преобразователь	77
4.6. Электростатические преобразователи	80
4.6.1. Емкостные преобразователи	80
4.6.2. Пьезоэлектрические преобразователи	88
5. ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ	95
5.1. Физические основы тепловых измерений	95
5.2. Терморезисторы	100
5.3. Термоэлектрические преобразователи	108
6. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	117
6.1. Физические основы оптических измерений	117
6.2. Источники оптического излучения	129
6.3. Приемники оптического излучения	130
6.3.1. Тепловые приемники	131
6.3.2. Фотоэмиссионные детекторы	132
6.3.3. Полупроводниковые детекторы	135
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	141

Учебное издание

Сюрдо Александр Иванович

Бирюков Дмитрий Юрьевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Редактор *И.В. Меркурьева*

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16.

Бумага типографская

Плоская печать

Усл. печ. л.

Уч.-изд. л.

Тираж

Заказ

Редакционно-издательский отдел УрФУ

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

rio@mail.ru